



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

# **ESTUDIO CON MODELOS DE DATOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN EN REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES**

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

*presentada por*

D. Miguel Jesús González Redondo

*dirigida por:*

Dr. D. Antonio Moreno Muñoz

Dr. D. Víctor Pallarés López

**Córdoba, noviembre de 2016**

TITULO: *ESTUDIO CON MODELOS DE DATOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN  
EN REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES*

AUTOR: *Miguel Jesús González Redondo*

---

© Edita: UCOPress. 2017  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

[www.uco.es/publicaciones](http://www.uco.es/publicaciones)  
[publicaciones@uco.es](mailto:publicaciones@uco.es)

---





**TÍTULO DE LA TESIS:**

**ESTUDIO CON MODELOS DE DATOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN EN REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES**

**DOCTORANDO/A: Miguel Jesús González Redondo**

**INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS**

El doctorando **Miguel Jesús González Redondo** comenzó los trabajos de tesis doctoral bajo nuestra supervisión en octubre de 2009. Se le propuso la investigación y el análisis del modelo de comunicaciones de la norma IEC 61850 para la automatización de las redes eléctricas inteligentes. En el nuevo contexto de las Smart grids es fundamental que los sistemas se comuniquen con una respuesta temporal estable y en tiempo real.

El objetivo principal de la tesis ha sido garantizar unos tiempos de transferencia mínimos. El estudio desarrollado por el doctorando se ha sustentado sobre un modelo experimental con el que evaluar la capacidad de transferencia en tiempo real de diferente número y tipo de datos. El modelo desarrollado en la tesis cumple con las especificaciones de estos sistemas. El trabajo desarrollado le ha permitido determinar la mejor forma de agrupar estos datos para un rendimiento óptimo. Los resultados obtenidos se han publicado en "Electric Power System Research" (Elsevier).

La tesis doctoral ha evolucionado hacia la integración del modelo en una plataforma industrial, en un escenario muy próximo al real. Los experimentos con Linux RT han sido muy satisfactorios. Podemos afirmar que hemos apreciado una mejora sustancial con respecto a los estudios iniciales. En la revista "Sensors" (MDPI) se han incluido unos resultados muy prometedores. Se prevé que los resultados derivados de esta tesis tengan transferencia directa en los proyectos de investigación relacionados con Smart grids que se están desarrollando tanto en el grupo de investigación como en toda España. Está previsto integrarlo en un sistema de monitorización para una planta fotovoltaica.

El doctorando ha desarrollado sus investigaciones durante una larga temporada, combinándolas con su apreciada labor docente en esta Universidad. Ha sido un trabajo paciente, concienzudo y exigente, que, para alegría de todos, ha culminado finalmente en una magnífica tesis doctoral. Como directores de esta tesis solo podemos mostrar nuestra satisfacción y profundo agradecimiento por su intensa dedicación. Estamos muy orgullosos del trabajo de Miguel y consideramos que ha superado satisfactoriamente los objetivos con la investigación que se presenta en esta memoria de tesis, logrando resultados de elevada relevancia científico-técnica.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 9 de noviembre de 2016

Firma de los directores

Fdo.: Antonio Moreno Muñoz

Fdo.: Víctor Pallarés López





*A mi mujer y a mis hijas.*



## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer su apoyo y confianza a mis directores de tesis, Antonio Moreno Muñoz y Víctor Pallarés López, por el apoyo y ánimos demostrados a lo largo de todo el proceso que ha llevado esta tesis. Antonio, ejemplo a seguir por su talante y buen hacer que ha tenido el acierto de saber liderar con indiscutible éxito un grupo que partió de la nada.

Víctor, ya al margen de haber logrado enderezar mi trayectoria investigadora, algo que nunca podré agradecerte, es un orgullo contar contigo día a día para todo. Desde que nos conocimos no has parado de ayudarme y apoyarme en todos los aspectos.

También quiero agradecerle especialmente a mi amigo y compañero Rafael todo el esfuerzo que ha hecho para lograr que termine la tesis mucho antes de lo que podría haber acabado. Hace muchos años que nos conocemos y, para mí, es un orgullo tenerte cerca. Rafa, si descanso estas vacaciones es gracias a ti.

No me puedo olvidar de mi buen amigo y compañero de sufrimientos cuando hicimos el segundo ciclo, y de aquellos viajes a la bodega para el proyecto del vino. Además, gracias a ti, en esta tesis he podido desarrollar una placa de circuito impreso de tal calidad y nivel que nunca pensé que haría. Pero lo más importante, gracias Juan por haber sido capaz de darme consejos cuando has notado que lo necesitaba, sin que yo te lo pidiera.

No puedo dedicaros un párrafo a cada uno, pero os tengo mucho que agradecer a todos, amigos y compañeros, Pepe, Josele, Víctor, Antonio, Juan, Aurora, Manuel Angel, Rafa, Isabel, Kiko, Chema y Matías. Como veréis os he nombrado según salgo de mi despacho hacia la derecha y luego bajo a por los demás. No puedo ponerlos en orden, todos estáis siempre que os necesito y, la verdad, en esta tesis ha sido muchas veces. Es cierto que algunos me habéis tenido que aguantar un poco más en los muchos baches que se presentan a lo largo de una tesis. Vosotros lo sabéis. Y no me olvido tampoco de Isa, nunca has dejado de sorprenderme por tu capacidad de trabajo, y Emilio, por ayudarme en todo lo que te he pedido.

Y le toca el turno a la familia, a Lourdes y a mis dos niñas. Os debo mucho por haber aguantado tantos años esperando que llegara este momento. Y por fin ha llegado. Espero poder devolveros el tiempo que os debo.

Pedro, mi hermano y asesor particular en muchos aspectos de mi tesis. Es sorprenderte cómo puedes tener la capacidad de revisar un documento que se sale completamente de tu ámbito y saber mejorarlo sustancialmente. Eres el modelo a seguir en capacidad de trabajo. Y a Paco y Antonio, por el tiempo que han dedicado con sus sobrinas mientras yo me volvía a casa a trabajar en la tesis, gracias. A mis padres, guías de mi destino, forjadores de mi personalidad y forma de ser, gracias por el apoyo continuo para avanzar profesional y personalmente, y por las horas de guardería. Vuestros ánimos han dado fruto. Sé que estaréis orgullosos de ver mis progresos.

En fin, me dejo muchos atrás, pero no puedo dedicar a los agradecimientos tanto tiempo como al resto de la tesis.

Finalmente, no puedo terminar estas líneas sin recordar y agradecer a Adolfo Plaza todo lo que hizo por mí y me enseñó durante el tiempo que compartimos en la Escuela, así como la labor que realizó aquí. Aún te recordamos Adolfo.

Gracias a todos.



## Abstract

The electricity distribution sector is radically changing with the emergence of renewable, distributed and non-programmable generation and its integration within the production of electricity companies. New challenges arise and approaches must be addressed that were not taken into account in the original conception of the electric network.

Aspects such as the efficient and sustainable management of energy make it necessary to develop a new concept of the network that is translated in what is now known as intelligent electricity grids, defined according to the Anglo-Saxon Smart Grid.

The Smart Grid concept brings to the grid the benefits of distributed computing and communications to provide real-time information and enable near-instantaneous balancing of supply and demand at the device level

The scenario that arises involves an effort in the development of the so-called Distribution Automation Systems (DAS). This, coupled with the use of adequate communication systems, allows the remote and real-time control and supervision of systems in charge of energy distribution

In this context, one of the aspects that is most relevant is the optimization of the transmission time of the systems in real time, especially in applications that require fast response times, such as protections.

Among the different international standards related to the electricity sector, the IEC 61850 standard has been of particular relevance since it is more than just a communications protocol, defining a data model and associated services that contribute to achieving interoperability between systems.

While characteristic aspects of the network such as topology or traffic have been extensively studied, there are some factors related to data and the data model that also affect the performance of the transmission of information and that have not been studied in the same extension. This thesis presents a set of tests to analyse some aspects related to the data and the model defined in IEC 61850 that can affect the performance of communications in the scope of the standard.

The standard is applied to different areas of the electrical system through its integration into different types of equipment and devices. In this thesis, its integration into an industrial programmable controller is studied and its behaviour for real-time applications is analysed.

This thesis ends with the analysis applying the data model to a specific application, an experimental analyser of quality of supply for its use in inverters of photovoltaic solar plants.

## Resumen

El sector de la distribución eléctrica está cambiando radicalmente con la aparición de la generación renovable, distribuida y no programable y su integración dentro de la producción de las compañías eléctricas. Aparecen nuevos retos y se deben afrontar planteamientos que no se tuvieron en cuenta en la concepción original de la red eléctrica.

Aspectos tales como la gestión eficiente y sostenible de la energía hacen necesario el desarrollo de un nuevo concepto de la red que se traduce en lo que hoy en día se conoce como las redes eléctricas inteligentes, definidas según el término anglosajón Smart Grid.

El concepto Smart Grid incorpora a la red eléctrica los beneficios de la computación distribuida y las comunicaciones para suministrar información en tiempo real y posibilitar el equilibrio casi instantáneo del suministro y la demanda a nivel de dispositivos

El escenario que se plantea conlleva un esfuerzo en el desarrollo de los llamados Sistemas para la Automatización de la Distribución de la energía eléctrica o Distribution Automation Systems (DAS). Esto, unido al empleo de adecuados sistemas de comunicación, permite el control y supervisión de forma remota y en tiempo real de los sistemas encargados de la distribución de la energía

En este contexto, uno de los aspectos que cobra mayor relevancia es la optimización del tiempo de transmisión de los sistemas en tiempo real, sobre todo en aquellas aplicaciones que requieren rápidos tiempos de respuesta, como es el caso de las protecciones.

De los diferentes estándares internacionales relacionados con el sector eléctrico, desde hace unos años ha cobrado especial relevancia el estándar IEC 61850, por ser algo más que un mero protocolo de comunicaciones, definiendo un modelo de datos y unos servicios asociados que contribuyen a lograr la interoperabilidad entre los sistemas.

Si bien los aspectos característicos de la red tales como topología o tráfico han sido ampliamente estudiados, hay algunos factores relacionados con los datos y el modelo de datos que también afectan al rendimiento de la transmisión de información y que no han sido objeto de estudio en la misma medida. En esta tesis se presenta un conjunto de ensayos destinados a analizar algunos aspectos relacionados con los datos y el modelo definido en IEC 61850 que pueden afectar al rendimiento de las comunicaciones en el ámbito del estándar.

El estándar se va aplicando a diferentes ámbitos del sistema eléctrico a través de su integración en diferentes tipos de equipos y dispositivos. En esta tesis se estudia su integración en un controlador programable industrial y se analiza su comportamiento para aplicaciones en tiempo real.

Esta tesis termina con el análisis de adaptación del modelo de datos a una aplicación concreta, un analizador experimental de calidad de suministro para su utilización en inversores de plantas solares fotovoltaicas.

## Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>	Corriente alterna
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>	Máquina RISC avanzada
BOOL	<i>Boolean</i>	Booleano
CDC	<i>Common Data Class</i>	Clase de datos comunes
CIM	<i>Common Information Model</i>	Modelo de información común
CLK	<i>Clock</i>	Reloj
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	Unidad central de proceso
DAS	<i>Distribution Automation Systems</i>	Sistemas para la automatización de la distribución de la energía eléctrica
DC	<i>Direct Current</i>	Corriente continua
DA	<i>Data Attribute</i>	Atributos de dato
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>	Equipos de generación distribuida
DG	<i>Distributed Generation</i>	Generación distribuida
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>	Instituto alemán de normalización
DNP	<i>Distributed Network Protocol</i>	Protocolo de red distribuida
DUT	<i>Device Under Test</i>	Dispositivo bajo prueba
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>	Memoria de solo lectura borrrable eléctricamente
EMC	<i>Electro Magnetic Compatibility</i>	Compatibilidad electromagnética
EMS	<i>Energy Management System</i>	Sistema de gestión de la energía
ES	<i>Embedded Systems</i>	Sistemas electrónicos embebidos
EPS	<i>Electrical Power Suite</i>	Paquete de energía eléctrica
FC	<i>Functional Constrains</i>	Restricciones funcionales
FIFO	<i>First In First Out</i>	Primero en entrar, primero en salir (pila de datos)
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>	Matriz de puertas programable en campo
GGIO	<i>Generic Process I/O</i>	Entradas/salidas genéricas de proceso
GSE	<i>Generic Substation Event</i>	Evento genérico de subestación
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>	Evento generic de subestación orientado a objetos
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>	Dispositivo electrónico inteligente
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	Comisión electrotécnica internacional
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
IP	<i>Internet Protocol</i>	Protocolo IP
IRM	<i>Interface Reference Model</i>	Modelo de referencia de interfaz
IT	<i>Information Technology</i>	Tecnologías de la información



LAN	<i>Local Area Network</i>	Red de área local
LN	<i>Logical Node</i>	Nodo lógico
LD	<i>Logical Device</i>	Dispositivo lógico
MDA	<i>Model Driven Architecture</i>	Arquitectura basada en modelos
MDK	<i>Module Development Kit</i>	Kit de desarrollo de módulos
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>	Especificación de mensajes de fabricación
MOSI	<i>Master Output Slave Input</i>	Salida del maestro, entrada del esclavo
MV-BPL	<i>Medium Voltage Broad Band Powerline</i>	Powerline para banda ancha y media tensión
OPNET	<i>Optimized Network Evaluation Tool</i>	Herramienta optimizada de evaluación de red
PAC	<i>Programmable Automation Controller</i>	Controlador de automatización programable
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>	Placa de circuito impreso
PNV	<i>Phase to Neutral Voltage</i>	Tensión fase-neutro
PQ	<i>Power Quality</i>	Calidad de suministro eléctrico
PQA	<i>Power Quality Analyzer</i>	Analizador de calidad de suministro
PTP	<i>Precision Time Protocol</i>	Protocolo para precisión temporal
QoS	<i>Quality of Service</i>	Calidad de servicio
RMS	<i>Root Mean Square</i>	Valor eficaz o cuadrático medio
RT	<i>Real Time</i>	Tiempo real
RTT	<i>Round Trip Time</i>	Tiempo de ida y vuelta
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>	Sistema operativos en tiempo real
SCL	<i>Substation Configuration Language</i>	Lenguaje de configuración de subestación
SGIRM	<i>Smart Grid Interoperability Reference Model</i>	Modelo de referencia de interoperabilidad en Smart Grid
SPQA	<i>Smart Power Quality Analyzer</i>	Analizador inteligente de calidad de suministro
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i>	Arquitectura orientada a servicios
SoC	<i>System on Chip</i>	Sistema en chip
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>	Bus de interfaz de periféricos serie
SV	<i>Sampled Value</i>	Valor muestreado
TI	<i>Texas Instruments</i>	Compañía Texas Instruments
TS	<i>Test Set</i>	Equipo de prueba
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>	Lógica transistor a transistor
VI	<i>Virtual Instrument</i>	Instrumento virtual
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>	Red de área local virtual
WAN	<i>Wide Area Network</i>	Red de área extendida

## Índice de contenidos

Abstract.....	I
Resumen.....	II
Abreviaturas.....	III
Índice de contenidos.....	V
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	XI
1    Introducción.....	1
1.1.    Motivación y objetivos de la tesis.....	1
1.2.    Sinopsis de la tesis.....	5
1.3.    Contribuciones de la tesis.....	6
1.3.1.    Aportaciones científicas derivadas directamente de la tesis doctoral.....	6
1.3.2.    Otras aportaciones científicas relacionadas con la tesis doctoral.....	7
2    Antecedentes y Fundamentos.....	11
2.1.    Contexto tecnológico.....	11
2.2.    El estándar internacional IEC 61850.....	13
2.2.1.    El modelo de datos IEC 61850.....	15
2.2.2.    Los servicios de comunicación IEC 61850.....	17
2.3.    Evaluación del rendimiento.....	18
2.3.1.    El tiempo de transferencia.....	18
2.3.2.    Medición del tiempo de transferencia.....	20
2.4.    Influencia de los datos.....	22
2.5.    Trabajos relacionados con la evaluación del rendimiento.....	24
2.6.    El modelo IEC 61850 para calidad de suministro.....	26
3    Materiales y Métodos.....	29
3.1.    Estudio de la influencia de los datos.....	29
3.1.1.    Configuración experimental.....	29
3.1.2.    Medida del rendimiento de las comunicaciones.....	31
3.2.    Integración de IEC 61850 en un sistema embebido.....	35
3.2.1.    Configuración experimental.....	35
3.2.2.    Medidas de rendimiento.....	37
3.2.3.    Integración de IEC 61850 en controladores basados en VxWorks.....	45
3.3.    Integración de IEC 61850 en un analizador de calidad de suministro.....	47
3.3.1.    Configuración experimental.....	47
3.3.2.    Verificación de funcionamiento.....	51

4	Resultados y Discusión .....	53
4.1.	<i>Estudio de factores que afectan al tiempo de procesamiento</i> .....	53
4.1.1.	Estudio de la influencia de los tipos de datos .....	54
4.1.2.	Estudio de la influencia del número de objetos de datos.....	63
4.1.3.	Estudio de la influencia de los <i>data sets</i> y su actualización.....	68
4.1.4.	Estudio de la influencia del tipo de nodo lógico .....	83
4.1.5.	Estudio de la influencia del número de nodos lógicos .....	84
4.2.	<i>Integración de IEC 61850 en un sistema embebido</i> .....	85
4.2.1.	Estudio de la influencia del número de objetos de datos.....	85
4.2.2.	Estudio de la influencia de los <i>data sets</i> y su actualización.....	96
4.2.3.	Estudio de la influencia de los nodos lógicos .....	106
4.3.	<i>Integración de IEC 61850 en controladores basados en VxWorks</i> .....	108
4.3.1.	Diseño del hardware.....	108
4.3.2.	Pruebas de funcionamiento .....	110
4.3.3.	Desarrollo del driver.....	112
4.4.	<i>Integración de IEC 61850 en un analizador de calidad de suministro</i> .....	114
4.4.1.	Modelo para la medida de continua .....	114
4.4.2.	Modelo para la medida de alterna.....	115
4.4.3.	Modelo para las medidas de potencia y energía.....	116
4.4.4.	Modelo para las medidas de calidad de suministro .....	117
4.4.5.	Verificación de funcionamiento.....	119
4.5.	<i>Discusión de resultados</i> .....	122
4.5.1.	Estudio de factores que afectan al tiempo de procesamiento .....	122
4.5.2.	Integración de IEC 61850 en un sistema embebido.....	124
4.5.3.	Integración de IEC 61850 en controladores con sistema VxWorks ..	125
4.5.4.	Integración de IEC 61850 en un analizador de calidad de suministro 126	
4.6.	<i>Implicaciones y recomendaciones prácticas</i> .....	126
5	Conclusiones y trabajo futuro .....	129
5.1.	<i>Conclusiones</i> .....	129
5.2.	<i>Trabajo futuro</i> .....	131
6	Bibliografía .....	133
	Anexo A: Publicaciones .....	139

## Índice de figuras

Figura 2.1. Jerarquía de objetos IEC 61850.....	16
Figura 2.2. Perfiles de comunicación IEC 61850. [31].....	18
Figura 2.3. Definición del tiempo de transferencia según IEC 61850-5. [34] .....	19
Figura 2.4. Tiempo de Round-Trip. [42].....	21
Figura 2.5. Test de Ping-Pong. [42].....	21
Figura 2.6. Rally test. [42] .....	22
Figura 2.7. Ejemplos de agrupación de 10 atributos de datos en diferentes <i>data sets</i> . [45].....	23
Figura 2.8. Llamadas a la función de actualización con diferentes <i>data sets</i> . [45].....	24
Figura 2.9. Factores que pueden afectar al tiempo de transferencia. ....	25
Figura 3.1. Configuración experimental. [45] .....	30
Figura 3.2. Medición de los tiempos de procesamiento y transferencia. [45] .....	32
Figura 3.3. Medición de los tiempos de procesamiento y transferencia. [45] .....	32
Figura 3.4. Diagrama de flujo de las aplicaciones servidor y cliente. [45] .....	33
Figura 3.5. Mensaje GOOSE capturado con Wireshark. ....	34
Figura 3.6. Configuración experimental. ....	37
Figura 3.7. Medición de los tiempos de procesamiento y transferencia [45]. ....	38
Figura 3.8. Medición de los intervalos temporales adicionales. ....	39
Figura 3.9. Algoritmo general de las aplicaciones servidor.....	40
Figura 3.10. Algoritmo general de generación de mensajes GOOSE.....	41
Figura 3.11. Algoritmo general de las aplicaciones cliente. ....	42
Figura 3.12. Algoritmo de la máquina de estados.....	43
Figura 3.13. Estabilidad de las mediciones en un mismo tipo de ensayo.....	44
Figura 3.14. Module Development Kit (MDK). [79] .....	46
Figura 3.15. PCB de un módulo de la serie C. [79].....	46
Figura 3.16. Vista conceptual del SPQA. ....	48
Figura 3.17. Esquema del proceso. ....	49
Figura 4.1. Transferencia de un dato tipo BOOL.....	55
Figura 4.2. Transferencia de un dato tipo INT32.....	56
Figura 4.3. Funciones de densidad de $T_t$ al transmitir un dato variando su tipo. ....	57
Figura 4.4. Comparativa de las funciones de densidad de $T_t$ según el tipo de datos.....	57
Figura 4.5. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ según el tipo de datos.....	58
Figura 4.6. Transferencia de diez datos tipo INT32.....	59
Figura 4.7. Funciones de densidad de $T_t$ al transmitir diez datos variando su tipo. ....	60
Figura 4.8. Comparativa de las funciones de densidad de $T_t$ según el tipo de datos.....	61
Figura 4.9. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ para diez datos según su tipo. ....	61
Figura 4.10. Influencia del tipo de dato sobre el tiempo de transferencia. ....	62
Figura 4.11. Transferencia de diez datos tipo BOOL. ....	64
Figura 4.12. Funciones de densidad de $T_t$ variando el número de datos. ....	65
Figura 4.13. Comparativa de las funciones de densidad de $T_t$ según el número de datos. ....	66
Figura 4.14. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ variando el número de datos.....	66
Figura 4.15. Influencia del número de datos sobre el tiempo de transferencia. ....	67
Figura 4.16. Influencia del número de <i>data sets</i> en el tiempo de transferencia.	
Transmisión de 10 objetos de datos tipo BOOL, agrupados en 1, 2, 5 y 10 <i>data sets</i> con una llamada a la función de actualización. ....	71
Figura 4.17. Influencia del número de <i>data sets</i> sobre el tiempo $T_t$ .....	71

Figura 4.18. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ según número de <i>data sets</i> .....	72
Figura 4.19. Influencia del número de <i>data sets</i> sobre el tiempo $T_1$ . ....	73
Figura 4.20. Variación del tiempo $T_1$ según el número de <i>data sets</i> .....	73
Figura 4.21. Influencia de las llamadas a la función de actualización en número coincidente con los <i>data sets</i> . ....	75
Figura 4.22. Influencia del número de llamadas a la función de actualización sobre el tiempo $T_t$ . ....	76
Figura 4.23. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ según número de <i>data sets</i> y llamadas a la función de actualización.....	77
Figura 4.24. Influencia del número de llamadas a la función de actualización sobre el tiempo $T_1$ .....	77
Figura 4.25. Comparativa de tiempos de transferencia $T_1$ según número de <i>data sets</i> y llamadas a la función de actualización.....	78
Figura 4.26. Influencia sobre el tiempo $T_t$ del número de llamadas a la función de actualización.....	80
Figura 4.27. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ según número de llamadas a la función de actualización.....	80
Figura 4.28. Influencia de las llamadas a la función de actualización para diez objetos de datos y diez <i>data sets</i> .....	81
Figura 4.29. Influencia sobre el tiempo $T_1$ del número de llamadas a la función de actualización.....	82
Figura 4.30. Comparativa de tiempos de transferencia $T_1$ según número el número de llamadas a la función de actualización.....	82
Figura 4.31. Influencia del número de nodos lógicos.....	85
Figura 4.32. Transferencia de un dato tipo BOOL.....	87
Figura 4.33. Transferencia de cinco datos tipo BOOL. ....	88
Figura 4.34. Transferencia de diez datos tipo BOOL.....	89
Figura 4.35. Funciones de densidad de $T_t$ según el número de datos. ....	90
Figura 4.36. Comparativa de las funciones de densidad de $T_t$ según el número de datos. .....	91
Figura 4.37. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ según número de datos.....	91
Figura 4.38. Funciones de densidad de $T_a$ según el número de datos.....	92
Figura 4.39. Comparativa de las funciones de densidad de $T_a$ según el número de datos. .....	93
Figura 4.40. Comparativa de tiempos de procesamiento $T_a$ según número de datos.....	93
Figura 4.41. Funciones de densidad de $T_c$ según el número de datos.....	94
Figura 4.42. Comparativa de las funciones de densidad de $T_c$ según el número de datos. .....	95
Figura 4.43. Comparativa de tiempos de procesamiento $T_c$ según el número de datos..	95
Figura 4.44. Transferencia de diez datos tipo BOOL en diez <i>data sets</i> .....	98
Figura 4.45. Funciones de densidad de los ensayos con diferentes <i>data sets</i> .....	99
Figura 4.46. Comparativa de las funciones de densidad variando el número de <i>data sets</i> . .....	99
Figura 4.47. Comparativa de tiempos de transferencia $T_t$ con 1, 2, 5 y 10 <i>data sets</i> .....	100
Figura 4.48. Comparativa de tiempos de procesamiento en el servidor $T_a$ según número de <i>data sets</i> . ....	101
Figura 4.49. Comparativa de tiempos de procesamiento en el cliente $T_c$ según número de <i>data sets</i> . ....	101
Figura 4.50. Tiempo $T_1$ en que es detectado el primer mensaje GOOSE según el número de <i>data sets</i> . ....	102

Figura 4.51. Tiempo $T_2$ en que es extraído el primer objeto del primer <i>data set</i> según el número de <i>data sets</i> .	103
Figura 4.52. Tiempo $T_3$ en que es extraído el primer <i>data set</i> del primer dato según el número de <i>data sets</i> .	103
Figura 4.53. Variación de los tiempos $T_1$ , $T_2$ , $T_3$ y $T_t$ con diferentes <i>data sets</i> .	104
Figura 4.54. Influencia del número de <i>data sets</i> en el tiempo de transferencia.	105
Figura 4.55. Comparativa de nodos lógicos GGIO y MMXU.	107
Figura 4.56. Diagrama de bloques de la plataforma para conectar cRIO y DK61.	108
Figura 4.57. Placa de circuito impreso para el módulo UCO61850.	109
Figura 4.58. Componentes del módulo UCO61850 antes de ensamblar.	109
Figura 4.59. Vista frontal del módulo UCO61850 terminado.	110
Figura 4.60. Vista trasera del módulo UCO61850 terminado.	110
Figura 4.61. Proyecto de prueba con dos módulos UCO61850.	111
Figura 4.62. Primera configuración de pruebas con UCO61850.	112
Figura 4.63. Escenario de las primeras pruebas con UCO61850.	113
Figura 4.64. Segunda configuración de pruebas con UCO61850.	113
Figura 4.65. Relación de variables de continua con objetos de datos IEC 61850.	114
Figura 4.66. Relación de variables de alterna con objetos de datos IEC 61850.	115
Figura 4.67. Relación de variables de potencia con objetos de datos IEC 61850.	116
Figura 4.68. Relación de variables de energía con objetos de datos IEC 61850.	117
Figura 4.69. Relación entre parámetros de eventos y objetos de datos IEC 61850.	118
Figura 4.70. Relación entre parámetros de cambios rápidos de tensión y objetos de datos IEC 61850.	119
Figura 4.71. Magnitudes de continua y alterna en el servidor.	120
Figura 4.72. Magnitudes de continua y alterna en el cliente.	120
Figura 4.73. Magnitudes de potencia en el servidor.	121
Figura 4.74. Magnitudes de potencia en el cliente.	121
Figura 4.75. Eventos de tensión en el servidor.	122
Figura 4.76. Eventos en el cliente.	122



## Índice de tablas

Tabla 2.1. Principales partes publicadas de IEC 61850 [15].....	14
Tabla 2.2. Algunos grupos de nodos lógicos. [35] .....	16
Tabla 2.3. Clases de rendimiento más críticas y tiempos de transferencia. [34] .....	20
Tabla 3.1. Funciones de acceso a datos de PIS-10. [47].....	31
Tabla 3.2. Hardware soportado por NI-Industrial Communications for IEC 61850 .....	36
Tabla 3.3. VIs para mensajes GOOSE [78].....	38
Tabla 3.4. Estabilidad de las mediciones en un mismo tipo de ensayo. ....	44
Tabla 3.5. VIs de tensión, corriente y frecuencia. ....	49
Tabla 3.6. VIs de potencia y energía. ....	49
Tabla 3.7. VIs de calidad de suministro. ....	50
Tabla 3.8. Nodos lógicos necesarios para las magnitudes del PQA.....	51
Tabla 4.1. Resumen del estudio con tipos de datos.....	54
Tabla 4.2. Influencia del tipo de dato al transmitir un objeto de datos. ....	55
Tabla 4.3. Valores estadísticos de la influencia del tipo de datos sobre $T_t$ .....	58
Tabla 4.4. Influencia del tipo de dato al transmitir 10 objetos de datos.....	59
Tabla 4.5. Valores estadísticos de la influencia del tipo de datos sobre $T_t$ .....	62
Tabla 4.6. Resumen del estudio con número de datos.....	63
Tabla 4.7. Influencia del número de objetos de datos. ....	63
Tabla 4.8. Valores estadísticos de la influencia del número de datos sobre $T_t$ .....	67
Tabla 4.9. Influencia de los <i>data sets</i> (DS) y llamadas a la función de actualización (C). ..	69
Tabla 4.10. Resumen del estudio con <i>data sets</i> . ....	70
Tabla 4.11. Distribución de los datos en diferentes <i>data sets</i> . ....	70
Tabla 4.12. Influencia del número de <i>data sets</i> sobre el tiempo de transferencia.....	70
Tabla 4.13. Valores estadísticos de la influencia del número de <i>data sets</i> sobre $T_t$ .....	74
Tabla 4.14. Resumen del estudio variando llamadas a la función de actualización y <i>data sets</i> . ....	74
Tabla 4.15. Distribución de los datos en diferentes <i>data sets</i> . ....	75
Tabla 4.16. Influencia del número de llamadas a la función de actualización coincidente con los <i>data sets</i> sobre el tiempo de transferencia.....	75
Tabla 4.17. Valores estadísticos de la influencia sobre $T_t$ del número de llamadas a la función de actualización .....	78
Tabla 4.18. Resumen del estudio variando las llamadas a la función de actualización. ....	79
Tabla 4.19. Distribución de las llamadas a la función de actualización. ....	79
Tabla 4.20. Influencia sobre el tiempo de transferencia del número de llamadas a la función de actualización con número de <i>data sets</i> constante. ....	79
Tabla 4.21. Valores estadísticos de la influencia sobre $T_t$ del número de llamadas a la función de actualización con número de <i>data sets</i> constante. ....	83
Tabla 4.22. Influencia del tipo de nodo lógico.....	83
Tabla 4.23. Influencia del número de nodos lógicos.....	84
Tabla 4.24. Resumen del estudio con número de datos. ....	86
Tabla 4.25. Influencia del número de objetos de datos. ....	86
Tabla 4.26. Valores estadísticos de la influencia del número de datos sobre $T_t$ .....	96
Tabla 4.27. Resumen del estudio con <i>data sets</i> . ....	97
Tabla 4.28. Distribución de los datos en diferentes <i>data sets</i> . ....	97
Tabla 4.29. Influencia del número de <i>data sets</i> sobre el tiempo de transferencia.....	97
Tabla 4.30. Influencia de los <i>data sets</i> sobre tiempos parciales. ....	104



Tabla 4.31. Valores estadísticos de la influencia del número de <i>data sets</i> sobre $T_t$ .....	105
Tabla 4.32. Resumen del estudio con nodos lógicos. ....	106
Tabla 4.33. Influencia del tipo de nodo lógico (GGIO). ....	106
Tabla 4.34. Influencia del tipo de nodo lógico (MMXU).....	107
Tabla 4.35. Relación de variables de continua con objetos de datos IEC 61850. ....	115
Tabla 4.36. Relación de variables de alterna con objetos de datos IEC 61850. ....	116
Tabla 4.37. Relación de variables de potencia con objetos de datos IEC 61850.....	116
Tabla 4.38. Relación de variables de energía con objetos de datos IEC 61850. ....	117
Tabla 4.39. Relación entre parámetros de eventos y objetos de datos IEC 61850. ....	118
Tabla 4.40. Relación entre parámetros de cambios rápidos de tensión y objetos de datos IEC 61850. ....	119
Tabla 4.41. Influencia de los factores relacionados con los datos. ....	127

# 1 Introducción

En este capítulo se expone el contexto de aplicación de la investigación, en torno a los sistemas y redes de comunicaciones para la automatización del sistema eléctrico. En este contexto se plantea la importancia del modelo de datos y su influencia en el rendimiento de las comunicaciones. Se introducen conceptos fundamentales que se utilizarán en el resto de capítulos de esta tesis, como es el tiempo de transferencia. Además, se plantean tanto los objetivos como la hipótesis de partida de la presente tesis. Del mismo modo, se expone la motivación que ha impulsado esta tesis y la metodología que se ha seguido para llevarla a cabo. Por último se listan las publicaciones científicas relacionadas con los trabajos que han llevado a la presente tesis doctoral.

## 1.1. Motivación y objetivos de la tesis

Tradicionalmente, las redes eléctricas han estado formadas por grandes centros de generación conectados a las líneas de transmisión, encargadas de suministrar energía a los sistemas de distribución. Esto implica que el flujo de energía es unidireccional, partiendo de las centrales de generación hasta llegar al consumidor, pasando por las redes de transporte y distribución.

En la concepción original de la red eléctrica no se tuvieron en cuenta algunos aspectos que hoy en día son fundamentales, tales como la eficiencia energética, el impacto ambiental o la capacidad de incorporación de fuentes de energía alternativas. Sin embargo, el sector de la distribución eléctrica está cambiando radicalmente con la aparición de la generación renovable, distribuida y no programable y su integración dentro de la producción de las compañías eléctricas [1]. La evolución experimentada recientemente continuará con nuevos requerimientos en cuanto a gestión eficiente y sostenible de la energía, lo que hace necesario el desarrollo de un nuevo concepto de la red que se traduce en lo que hoy en día se conoce como las redes eléctricas inteligentes, definidas según el término anglosajón Smart Grid [2], [3].

El desarrollo de una solución global de Smart Grids debe contemplar desde la generación distribuida, hasta la gestión de la demanda, integradas en una plataforma de operaciones y monitorización en tiempo real [4]. Se plantea una red activa, dotada de inteligencia autónoma, con capacidad de reconfiguración según las necesidades locales,

mejorando los tiempos de restablecimiento del suministro e incrementando la eficiencia en general [5].

El concepto Smart Grid incorpora a la red eléctrica los beneficios de la computación distribuida y las comunicaciones para suministrar información en tiempo real y posibilitar el equilibrio casi instantáneo del suministro y la demanda a nivel de dispositivos[6]. Las futuras Smart Grids aportarán robustez, flexibilidad y fiabilidad al sistema eléctrico, integrando funciones de autorrecuperación, que las harán totalmente controlables y eficientes. De este modo proporcionarán una plataforma para hacer posible la coexistencia de Smart Grids con sistemas tanto de generación distribuida (*Distributed Generation*, DG) como centralizada. El escenario que se plantea conlleva un esfuerzo en el desarrollo de los llamados sistemas para la automatización de la distribución de la energía eléctrica o *Distribution Automation Systems* (DAS). Esto, unido al empleo de adecuados sistemas de comunicación, permite el control y supervisión de forma remota y en tiempo real de los sistemas encargados de la distribución de la energía [7].

Queda claro, por tanto, que las Smart Grids juegan un importante papel en desarrollo y modernización del sistema eléctrico. Uno de los objetivos que plantean las Smart Grids es que el flujo bidireccional de energía se debe adaptar dinámicamente a los nuevos recursos energéticos distribuidos (*Distributed Energy Resources*, DER) con un alto grado de estabilidad, coordinación y sincronismo [8], [9]. Por otro lado, las Smart Grids se basan en la integración de las tecnologías de la información (*Information Technology*, IT) y la red eléctrica. Por esto es importante considerar ciertos requerimientos para un sistema de comunicación común, tales como la calidad del servicio (*Quality of Service*, QoS), flexibilidad y seguridad [10]. Para lograr tales objetivos es necesaria una clara definición de necesidades, así como de la capacidad de interoperabilidad entre los diferentes sistemas.

El estándar IEEE 2030 [11] para las Smart Grids define los tipos de interoperabilidad entre diferentes tecnologías y sistemas de energía. Igualmente establece lo que se conoce como el modelo de referencia para interoperabilidad en Smart Grid (*Smart Grid Interoperability Reference Model*, SGIRM). Este modelo proporciona una perspectiva para la integración de la arquitectura del sistema eléctrico con el sistema de comunicaciones así como con la tecnología para el procesamiento y difusión de la información.

Considerando un criterio común para calidad de servicio [12], uno de los aspectos más importantes es la optimización del tiempo de transmisión de los sistemas en tiempo real [13], [14]. Basados en este criterio y en el tipo de aplicación es posible definir diferentes categorías de aplicaciones, tales como protección, control, monitorización y análisis.

El estándar internacional IEC 61850 [15] facilita la integración de los equipos del sistema eléctrico con una arquitectura de comunicación basada en los principios de interconexión distribuida y en la definición semántica de los datos, así como en la información necesaria para lograr la deseada interoperabilidad. El estándar internacional IEC 61850 incluye modelos de datos para las diferentes categorías de aplicaciones antes mencionadas, protección, control, monitorización y análisis. Entre aquellas, las aplicaciones de protección son las que se caracterizan por necesitar menores tiempos de respuesta. Son aplicaciones críticas en el tiempo. Este tiempo de respuesta debe ser

menor de 10 ms [16], [17]. El estándar IEC 61850 define servicios de comunicación capaces de dar respuesta a estas necesidades.

Los estudios presentados en esta tesis están directamente relacionados con aquellas aplicaciones en las cuales el tiempo de respuesta es crítico. El rendimiento de las comunicaciones según el estándar IEC 61850 depende de diversos factores, algunos de los cuales han sido ya estudiados y publicados sus resultados en la literatura. Sin embargo, la influencia del tiempo de procesamiento en la transmisión no ha sido suficientemente estudiada. Mediante diferentes ensayos llevados a cabo en el curso de esta tesis se ha observado que algunos aspectos relacionados con los datos y con el modelo de datos IEC 61850 tienen una influencia directa sobre el tiempo de respuesta y, por tanto, sobre el rendimiento del sistema.

Por otro lado, la naturaleza intermitente de generación eólica y solar plantea problemas operativos y desafíos en las *microgrids* y para asegurar la continuidad del abastecimiento eléctrico otras *microgrids* deben ser capaces de responder rápidamente para sustituir a las fuentes que generan energía de forma intermitente [18]. A medida que aumenta la penetración de energías renovables resulta cada vez más difícil mantener el equilibrio con el aumento de la variabilidad y la incertidumbre en el suministro de energía eléctrica [19]. Por ello, en este contexto, es vital la incorporación de analizadores de calidad de suministro (*Power Quality Analyzers*, PQA) que actúen como medidores básicos de potencia y energía, como sistema para determinar la calidad de suministro según el estándar internacional IEC 61000-4-30 [20]. Del mismo modo, estos PQA deberían implementar un sistema de detección y clasificación rápida de aquellos eventos críticos que pudieran reducir notablemente el rendimiento del sistema de generación de energía.

Como ya se ha mencionado, uno de los requisitos clave para lograr una distribución inteligente de la energía es la integración de dispositivos inteligentes que se comuniquen en tiempo real [13], [14] y que lo hagan con un alto grado de estabilidad, de coordinación y de sincronismo [9]. Por ello, estos PQA deben incorporar un sistema de comunicación estandarizado para establecer un enlace con otros dispositivos especializados en la gestión, en el control o en la protección de la instalación. Esta comunicación debe estar basada en estándares reconocidos internacionalmente, como es el caso de IEC 61850.

La integración en un PQA de algoritmos avanzados de detección de eventos críticos junto con las capacidades de comunicación acordes a las tendencias en Smart Grids, daría lugar al concepto de analizador inteligente de calidad de suministro (*Smart Power Quality Analyzer*, SPQA). El estándar internacional IEC 61850 facilita la integración en las redes inteligentes de un SPQA mediante una arquitectura de comunicación basada en los principios de interconexión distribuida y en una definición semántica que se adapta al tipo de interoperatividad deseada.

Teniendo en cuenta todo lo expuesto, es evidente que es de gran importancia el modelo de comunicación elegido [12]. Es necesario un modelo que proporcione un soporte para la automatización y monitorización distribuida con una administración descentralizada y que admita funciones optimizadas para eventos críticos. Así pues, en esta tesis se estudia y plantea la integración del modelo IEC 61850 en un analizador experimental de calidad del suministro eléctrico para inversores en plantas fotovoltaicas, con objeto de integrarlo en la red eléctrica inteligente.

El *objetivo general* de esta tesis es el estudio y aplicación del sistema de comunicaciones basado en la norma internacional IEC 61850 para la automatización de las redes eléctricas inteligentes.

Para ello se pretenden alcanzar los siguientes *objetivos específicos*:

- Investigar la influencia de factores relacionados con el modelo de datos en el rendimiento de la transferencia de información en el contexto de la automatización de redes eléctricas inteligentes.
- Analizar la viabilidad de integración del modelo IEC 61850 en un sistema embebido para su aplicación a sistemas en tiempo real, mediante el análisis del tiempo de transferencia como indicador de rendimiento.
- Estudiar y plantear la integración del modelo IEC 61850 en un analizador experimental de calidad del suministro eléctrico para inversores en plantas fotovoltaicas, con objeto de integrarlo en la red eléctrica inteligente.
- Establecer conclusiones sobre la integración de las comunicaciones acordes con el estándar IEC 61850 en dispositivos electrónicos inteligentes, (*Intelligent Electronic Devices*, IEDs) basados en plataformas embebidas, en el equipamiento de una red Smart Grid.

La *metodología* planteada para el desarrollo de esta tesis doctoral está basada en los siguientes puntos:

- Revisión del estado del arte, de forma que se analice el contexto tecnológico dentro de los sistemas de comunicación y protocolos para redes eléctricas inteligentes.
- Basándose en una configuración experimental acorde con los objetivos, se realizarán ensayos para determinar la influencia de factores relacionados con el modelo de datos sobre el rendimiento de las comunicaciones entre dispositivos electrónicos inteligentes.
- Se aplicará el sistema de comunicaciones IEC 61850 a un sistema embebido utilizando el entorno “LabVIEW” de *National Instruments* (NI) y se estudiará su capacidad de transferencia de información en tiempo real. Para ello se plantearán diferentes alternativas a la hora de medir el rendimiento.
- Integración del modelo de comunicación IEC 61850 en un sistema embebido experimental dedicado al análisis de calidad de suministro para inversores en plantas fotovoltaicas. Para ello se aplicará el modelo de datos IEC 61850 adaptado a las necesidades de representación de datos del analizador experimental y se utilizarán los servicios de comunicación necesarios para la transferencia óptima de la información.

Las *aportaciones* de esta tesis están directamente relacionadas con los objetivos expuestos. La principal aportación es el estudio de factores relacionados con el modelo de datos que pueden afectar al rendimiento de las comunicaciones en un sistema basado en el estándar internacional IEC 61850. Entre estos se ha constatado experimentalmente que hay influencia sobre el tiempo de procesamiento de dos factores íntimamente relacionados, la forma en que pueden ser agrupados los datos para su transmisión y la manera en la cual se gestiona dicha transmisión de datos.

Otra aportación es la aplicación y análisis de rendimiento del modelo de datos IEC 61850 a un prototipo experimental de analizador de calidad de suministro para su uso en inversores de instalaciones fotovoltaicas.

Una última aportación es el diseño preliminar de un módulo hardware específico para la integración de las comunicaciones IEC 61850 en controladores programables compactRIO (cRIO) de *National Instruments* que permita su utilización en modelos cRIO con sistemas operativos VxWorks, no basados en el sistema operativo Linux-RT.

## 1.2. Sinopsis de la tesis

El documento de esta tesis está dividido en cinco capítulos. En este primer capítulo se sitúa el contexto de aplicación de la investigación, la motivación que la impulsa y los objetivos que se persiguen. A continuación se describen los contenidos del resto de los capítulos del documento.

- *Capítulo 2 – Antecedentes y Fundamentos:* Este capítulo se inicia con una breve descripción del estándar IEC 61850 prestando atención al modelo de datos y los servicios de comunicación asociados en que se basa. Se describe la métrica propuesta por el estándar para evaluación del rendimiento de las comunicaciones. Del mismo modo se introducen los fundamentos en los cuales se basa la hipótesis de partida según la cual diversos aspectos relacionados con los datos pueden influir en el rendimiento de transmisión de datos.
- *Capítulo 3 – Materiales y Métodos:* Este capítulo está dividido en tres grandes apartados. En el primero se describe lo relacionado con el primer estudio llevado a cabo que pone de manifiesto la influencia de los datos sobre el tiempo de transferencia en un sistema basado en el estándar IEC 61850. Se describen tanto la configuración experimental como los métodos que se siguieron para determinar dicha influencia. El segundo apartado se dedica a la descripción de la configuración experimental y las medidas de rendimiento que se siguieron a la hora de estudiar la integración de IEC 61850 en un sistema embebido. Finalmente, el tercer apartado está dedicado a la descripción de la configuración experimental y el modelo adecuado para la implementación del estándar IEC 61850 en un analizador experimental de calidad de suministro.
- *Capítulo 4 – Resultados y Discusión:* Se plantean aquí los resultados obtenidos de los ensayos realizados para determinar la influencia de los datos sobre el tiempo de procesamiento en las comunicaciones basadas en el estándar IEC 61850. Del mismo modo se incluyen los resultados obtenidos de la integración del estándar en un sistema embebido. Finaliza el capítulo con los resultados de la aplicación del modelo de datos IEC 61850 a un analizador experimental de calidad de suministro eléctrico.
- *Capítulo 5 – Conclusiones y trabajo futuro:* En este capítulo se presentan las principales conclusiones que se extraen de los trabajos llevados a cabo a lo largo de la investigación. Igualmente se proponen los aspectos susceptibles de profundización o mejora. Se termina aportando posibles líneas de investigación que sean continuación del trabajo desarrollado en esta tesis.

### **1.3. Contribuciones de la tesis**

La presente tesis ha dado lugar a una serie de publicaciones que se detallan a continuación. Estas contribuciones se dividen en dos secciones, las surgidas directamente de la tesis y aquellas que tienen una estrecha relación con la misma ya que son fruto de investigaciones relacionadas de algún modo con la temática de la tesis. En estas secciones las publicaciones aparecen en orden cronológico inverso.

#### **1.3.1. Aportaciones científicas derivadas directamente de la tesis doctoral**

##### **1.3.1.1. Revistas con índice de impacto**

*Influence of data-related factors on the use of IEC 61850 for power utility automation*

Revista: Electric Power Systems Research.

Autores: M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, and R. J. Real-Calvo.

Índice de impacto según JCR de ISI Web 2015: 1.809.

Cuartil: Q2 en JCR; Q1 en SJR.

Volumen: 133. Páginas: 269–280. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.12.028.

Fecha de publicación: Abril 2016.

##### **1.3.1.2. Aportaciones a congresos**

*IEC 61850 GOOSE transfer time measurement in development stage*

Congreso: 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).

Autores: M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, R. J. Real-Calvo, M. A. O. Lopez, and I. M. Moreno-Garcia.

Páginas: 1-6. DOI: 10.1109/ISIE.2013.65637622.

Fecha de publicación: Mayo 2013.

*Testing transfer time in development stage for IEC 61850 based IEDs*

Congreso: ARSA 2012, Proceedings in Advanced Research in Scientific Areas 2012.

Autores: M. J. González-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallarés-Lopez, R. J. Real-Calvo, and I. M. Moreno-Garcia

Páginas: 1644–1648. ISBN: 978-80-554-0606-0. ISSN: 1338-9831.

Fecha de publicación: Diciembre 2012.

### 1.3.2. Otras aportaciones científicas relacionadas con la tesis doctoral

#### 1.3.2.1. Revistas con índice de impacto

*Real-Time Monitoring System for a Utility-Scale Photovoltaic Power Plant*

Revista: Sensors.

Autores: I. M. Moreno-García, E. J. Palacios-García, V. Pallares-Lopez, I. Santiago, M. J. Gonzalez-Redondo, M. Varo-Martínez and R. Real-Calvo.

Índice de impacto según JCR de ISI Web 2015: 2.033.

Cuartil: Q2 en JCR; Q1 en SJR.

Volumen: 16, número: 6. Páginas: 25. DOI: 10.3390/s16060770.

Fecha de publicación: 26 Mayo 2016.

*An Embedded System in Smart Inverters for Power Quality and Safety Functionality*

Revista: Energies.

Autores: R. Real-Calvo, A. Moreno-Munoz, J. Gonzalez-De-La-Rosa, V. Pallares-Lopez, M. Gonzalez-Redondo, and I. Moreno-García.

Índice de impacto según JCR de ISI Web 2015: 2.077.

Cuartil: Q2 en JCR; Q1 en SJR.

Volumen: 9, número: 3. Páginas: 219. DOI: 10.3390/en9030219.

Fecha de publicación: 18 Marzo 2016.

*Grid-Tied Smart Inverter Safety Functionality: Fast Power Quality Event Detection*

Revista: MIDEEM - Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials.

Autores: Isabel M. Moreno-García, Antonio Moreno-Munoz, Aurora Gil-de-Castro, Rafael Real-Calvo, Emilio J. Palacios-García, Miguel J. González-Redondo.

Índice de impacto según JCR de ISI Web 2015: 0.433.

Cuartil: Q4 en JCR; Q3 en SJR.

Volumen: 45, número: 3. Páginas: 204 – 215. DOI: En edición.

Fecha de publicación: 2015.

*Embedding Synchronized Measurement Technology for Smart Grid development*

Revista: IEEE Transactions on Industrial Informatics.

Autores: Moreno-Muñoz, A., Pallares-López, V., de La Rosa, J.J.G., Redondo, M.G., Real-Calvo, R., García, I.M.

Índice de impacto según JCR de ISI Web 2013: 8.785.

Cuartil: Q1 en JCR; Q1 en SJR.

Volumen: 9, número: 1. Páginas: 52 – 61. DOI: 10.1109/TII.2012.2209659.

Fecha de publicación: Febrero 2013.



*Synchrophasor for Smart Grid with IEEE 1588-2008 Synchronism*

Revista: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)

Autores: Pallares-López, V., Moreno-Muñoz, A., de La Rosa, J.J.G., Redondo, M.G., Real-Calvo, R., García, I.M., de Castro, A.G., Pérez, F.D.

Índice de impacto según JCR de ISI Web 2011: 0.224.

Cuartil: Q4 en JCR; Q3 en SJR.

Fecha de publicación: Enero 2012. Vol. 88, Número 1 A, páginas 31 -36.

ISSN: 0033-2097. Referencia: [pe.org.pl/articles/2012/1<sup>a</sup>/6.pdf](http://pe.org.pl/articles/2012/1a/6.pdf).

**1.3.2.2. Capítulos de libro***Deterministic Ethernet Synchronism with IEEE 1588 Base System for Synchrophasor in Smart Grid and Integration in IEC 61850 Standard.*

Libro: Communication and Networking in Smart Grids.

Autores capítulo 9: Víctor Pallares-López, A. Moreno-Muñoz, M. González-Redondo, R. Real-Calvo, I. M. Moreno-García and Juan José González de la Rosa.

Autor del Libro: Yang Xiao, The University of Alabama, Tuscaloosa, USA.

Páginas: 195–215. Fecha de publicación: 25 de Abril 2012 con 325 páginas.

Editorial: CRC Press (Taylor and Francis Group).

Referencia: <http://www.crcpress.com/product/isbn/9781439878736>.

Print ISBN: 978-1-4398-7873-6.

eBook: ISBN: 978-1-4398-7872-9. Id. Digital: 10.1201/b11897-12.

**1.3.2.3. Aportaciones a congresos***Intelligent electronic device for the control of distributed generation*

Congreso: 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin).

Autores: R. J. Real-Calvo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, M. J. Gonzalez-Redondo, and J. M. Flores-Arias.

Páginas: 268–269. DOI: 10.1109/ICCE-Berlin.2014.7034338.

Fecha de publicación: 5 Febrero 2015

*Design of an Intelligent Electronic Device to control a private microgrid*

Congreso: 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin).

Autores: Real-Calvo, R.J.; Moreno-Munoz, A.; Pallares-Lopez, V.; Gonzalez-Redondo, M.J.; Moreno-Garcia, I.M.

Páginas: 99-101. DOI: 10.1109/ICCE-Berlin.2012.6336492.

Fecha de publicación: Septiembre 2012.

*Synchronism with Software-Based IEEE 1588–2008 for Smart Grid*

Congreso: 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).

Autores: V. Pallares-Lopez, A. Moreno-Munoz, M. Gonzalez-Redondo, R. Real-Calvo, I. M. Moreno-García, J. M. Flores Arias, A. G. de Castro, and J. J. G. de la Rosa.

Páginas: 1237-1242. DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984335.

Fecha de publicación: Junio 2011.

*Synchrophasor integration in IEC 61850 standard for SmartGrid and synchronism with PTP-base system*

Congreso: 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).

Autores: V. Pallares-Lopez, A. Moreno-Munoz, M. Gonzalez-Redondo, R. Real-Calvo, I. M. Garcia, and J. J. G. de la Rosa.

Páginas: 1507-1512. DOI: 10.1109/ICIEA.2011.5975829.

Fecha de publicación: Junio 2011.

*Deterministic Ethernet synchronism with PTP-base system for synchrophasor in Smart Grid*

Congreso: 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics, CPE 2011 - Conference Proceedings.

Autores: V. Pallares-Lopez, A. A. Moreno-Muñoz, M. González-Redondo, R. Real-Calvo, I. M. García, A. G. De Castro, F. D. Pérez, and J. J. G. De La Rosa.

Páginas: 22–27. DOI: 10.1109/CPE.2011.5942201.

Fecha de publicación: 2011.



## 2 Antecedentes y Fundamentos

Este capítulo, tras introducir el contexto tecnológico de la tesis, se inicia con una breve descripción del estándar IEC 61850 prestando atención al modelo de datos y los servicios de comunicación asociados en que se basa. Se describe la métrica propuesta por el estándar para evaluación del rendimiento de las comunicaciones. Del mismo modo se introducen los fundamentos en los cuales se basa la hipótesis de partida de esta tesis, según la cual diversos aspectos relacionados con los datos pueden influir en el rendimiento de las comunicaciones.

### 2.1. Contexto tecnológico

Existen múltiples estándares que describen protocolos y sistemas de comunicaciones para su utilización en el contexto de las redes eléctricas inteligentes. La interoperabilidad es un aspecto fundamental en dicho contexto, entendiendo esta como la capacidad de dos o más sistemas de intercambiar información y utilizar la información que ha sido intercambiada [21]. La ausencia de estándares ampliamente aceptados limita la interoperabilidad entre equipos y sistemas. Por ello, diversas organizaciones regionales, nacionales e internacionales trabajan en el desarrollo de estándares con esta finalidad.

De los estándares, especificaciones y protocolos de comunicaciones que se han definido a lo largo de los últimos años y que de algún modo están relacionados con la evolución de la red eléctrica hacia Smart Grid se encuentran, entre otros, los siguientes:

- *BACNet. ISO 16484-5:2003 Building automation and control systems -- Part 5: Data communication protocol*. Define servicios y protocolos de comunicación de datos para equipos informáticos utilizados para la monitorización y control de sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración y otros sistemas de construcción. Define, además, una representación abstracta y orientada a objetos de la información que se transmite entre dichos equipos, facilitando así la aplicación y el uso de la tecnología de control digital en edificios.
- *IEEE 1815-2012 - IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3)*. Especifica la estructura del protocolo DNP3, las funciones y funciones de aplicación para interoperabilidad. El nivel

de aplicación más simple está destinado a dispositivos de alimentación de distribución de bajo costo y el más complejo para sistemas completos. El protocolo es adecuado para el funcionamiento en una variedad de medios de comunicación compatibles con la composición de la mayoría de los sistemas de comunicación de energía eléctrica [22].

- *IEC 60870-5 Telecontrol equipment and systems - Part 5: Transmission protocols.* Este estándar proporciona una serie de estándares para la transmisión de información en el dominio de la instalación eléctrica. Las partes IEC 60870-5-101 y 104 se usan fundamentalmente para el intercambio de información entre subestaciones y centros de control, así como dentro de las subestaciones. La parte 104 supera las limitaciones de la parte 101 en cuanto a rendimiento de las comunicaciones al basarse en las comunicaciones Ethernet y TCP/IP [23].
- *IEC 60870-6-802:2014 Telecontrol equipment and systems - Part 6-802: Telecontrol protocols compatible with ISO standards and ITU-T recommendations - TASE.2 Object models.* Especifica un método de intercambio de datos de centros de control críticos en el tiempo a través de redes de área amplia y de área local utilizando una pila de protocolos completa compatible con ISO. Contiene disposiciones para el soporte de arquitecturas centralizadas y distribuidas. La norma incluye el intercambio de indicaciones de datos en tiempo real, operaciones de control, datos de series temporales, información de planificación y contabilidad, control remoto de programas y notificación de eventos [24].
- *IEC 61850:2016 SER Series. Communication networks and systems for power utility automation.* Es aplicable a los sistemas de automatización de las empresas eléctricas y define la comunicación entre dispositivos electrónicos inteligentes en dicho sistema y los requisitos relacionados con el sistema [15].
- *IEC 61968. Application integration at electric utilities - System interfaces for distribution management.* Es una serie de estándares que, en su conjunto, define interfaces para los elementos principales de una arquitectura de interfaz para la gestión de la distribución. Identifica y establece recomendaciones para interfaces estándar basadas en un Modelo de Referencia de Interfaz (IRM). Este conjunto de normas se limita a la definición de interfaces. Proporcionan interoperabilidad entre diferentes sistemas informáticos, plataformas y lenguajes [25].
- *IEC 61970. Energy Management system application program interface (EMS-API).* Define el intercambio de datos, información semántica, clases y servicios disponibles para aplicaciones de sistemas de gestión de la energía (*energy management systems*, EMS). La arquitectura orientada a servicios (*service oriented architecture*, SOA) permite la generación de aplicaciones para EMS. La descripción de los datos y los modelos de datos se describen en las distintas subpartes de IEC 61970. Entre estas destaca la parte 301 que define el modelo de información común (*common information model*, CIM), que es un modelo abstracto para representar los principales objetos en una instalación eléctrica. CIM facilita la integración de aplicaciones EMS de diferentes fabricantes mediante la definición de un lenguaje común (semántica) [23].
- *IEEE 1588-2008 - IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.* Esta norma define un protocolo que permite la sincronización precisa de relojes en sistemas de medición y control

implementados con tecnologías tales como comunicación en red, computación local y objetos distribuidos. El protocolo es aplicable a sistemas que se comunican por redes de área local que soportan mensajes de multidifusión incluyendo, pero no limitándose a, Ethernet [26].

- *IEEE 2030-2011 - IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads.* Proporciona enfoques alternativos y recomendaciones para lograr interoperabilidad en Smart Grid. Establece el modelo de referencia para interoperabilidad en Smart Grid y proporciona una base de conocimiento con terminología para direccionamiento, características, rendimiento funcional y criterios de evaluación, así como los principios de ingeniería de aplicaciones para interoperabilidad en Smart Grid. Define tres perspectivas de arquitecturas: sistemas de energía, tecnologías de comunicación y tecnología de información [11].

Tanto la comisión electrotécnica internacional (*International Electrotechnical Commission*, IEC), como el instituto nacional de estándares y tecnología de Estados Unidos (*National Institute of Standards and Technology*, NIST) han preparado hojas de ruta para la estandarización de las Smart Grids [23], [27]. En dichas hojas de ruta se han identificado los principales estándares relacionados con la red eléctrica que soportan interoperabilidad entre equipos y sistemas para Smart Grid, entre los que se encuentran los mencionados anteriormente. De entre estos estándares, ambos organismos coinciden en recomendar que la serie de estándares IEC 61850 sea utilizada para el desarrollo de Smart Grid.

Del mismo modo, ambas organizaciones recomiendan el uso de IEEE 1588 para sincronización temporal de alta precisión. Tanto IEC 61850 como IEEE 1588 se basan en la red Ethernet, lo cual permite mejorar la eficiencia en el diseño y construcción de subestaciones por medio del uso de una única red de comunicaciones para múltiples aplicaciones [28].

## **2.2. El estándar internacional IEC 61850**

El estándar IEC 61850 fue desarrollado y publicado entre 2003 y 2005 con la finalidad de estandarizar el intercambio de información mediante redes de comunicaciones y lograr la interoperabilidad entre dispositivos electrónicos inteligentes (Intelligent Electronic Devices, IED) en subestaciones eléctricas. El estándar recibió originalmente el nombre de “Communication Networks and Systems in Substations” [29].

La primera edición del estándar IEC 61850 fue un conjunto de documentos de unas 1400 páginas, dividido en 10 partes. Las partes 1 a 3 proporcionan las ideas generales del estándar. La parte 4 define el proyecto y los requisitos de gestión para una subestación basada en IEC 61850. La parte 5 especifica los parámetros necesarios para la implementación física. En la parte 6 se define un lenguaje basado en XML para la configuración de los IEDs. La parte 7 desarrolla los conceptos lógicos, estando dividida a su vez en cuatro partes. La parte 8 describe el mapeo de los objetos internos a las capas de presentación y Ethernet. La parte 9 define el mapeo de valores muestreados a enlaces punto a punto en Ethernet. La última parte especifica las instrucciones para tests de conformidad [30].

**Tabla 2.1. Principales partes publicadas de IEC 61850 [15].**

<b>Parte</b>	<b>Título</b>
IEC/TR 61850-1:2013	Introduction and Overview
IEC/TS 61850-2:2003	Glossary
IEC 61850-3:2013	General Requirements
IEC 61850-4:2011	System and Project Management
IEC 61850-5:2013	Communications Requirements for Functions and Device Models
IEC 61850-6:2009	Configuration Description Language for Communication in Electronic Substation Related to IEDs
IEC 61850-7-1: 2011	Basic communication structure - Principles and models
IEC 61850-7-2:2010	Basic information and communication structure - Abstract communication service interface (ACSI)
IEC 61850-7-3:2010	Basic communication structure - Common data classes
IEC 61850-7-4:2010	Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes
IEC 61850-7-410:2012+AMD1:2015 CSV	Hydroelectric power plants - Communication for monitoring and control
IEC 61850-7-420:2009	Basic communication structure - Distributed energy resources logical nodes
IEC/TR 61850-7-510:2012	Basic communication structure - Hydroelectric power plants - Modelling concepts and guidelines
IEC 61850-8-1:2011	Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3
IEC 61850-9-1:2003	Specific communication service mapping (SCSM) – Samples values over serial unidirectional multidrop point to point link
IEC 61850-9-2:2011	Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3
IEC 61850-10:2012	Conformance testing
IEC TS 61850-80-1:2016	Guideline to exchanging information from a CDC-based data model using IEC 60870-5-101 or IEC 60870-5-104
IEC TR 61850-80-3:2015	Mapping to web protocols - Requirements and technical choices
IEC TS 61850-80-4:2016	Translation from the COSEM object model (IEC 62056) to the IEC 61850 data model
IEC TR 61850-90-1:2010	Use of IEC 61850 for the communication between substations
IEC TR 61850-90-2:2016	Using IEC 61850 for communication between substations and control centres
IEC TR 61850-90-3:2016	Using IEC 61850 for condition monitoring diagnosis and analysis
IEC TR 61850-90-4:2013	Network engineering guidelines
IEC TR 61850-90-5:2012	Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118
IEC TR 61850-90-7:2013	Object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems
IEC TR 61850-90-8:2016	Object model for E-mobility
IEC TR 61850-90-12:2015	Wide area network engineering guidelines
IEC/IEEE 61850-9-3:2016	Precision time protocol profile for power utility automation

Posteriormente, diversas partes del estándar fueron actualizadas y etiquetadas como “edición 2”. Además, se añadieron nuevas partes, extendiendo su aplicación a otros dominios de la red eléctrica. Como consecuencia de esto, el estándar cambió su nombre a “*Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*” [15]. La Tabla 2.1 lista las principales partes publicadas del estándar.

Uno de los principales objetivos del estándar IEC 61850 es lograr la interoperabilidad entre IEDs. El concepto de interoperabilidad permite la integración de dispositivos en la red eléctrica independientemente del fabricante. Para lograr esto, el estándar IEC 61850 modela todos los elementos presentes en el sistema, tanto los dispositivos físicos (relés, transformadores, etc.) como las funciones involucradas (control, protección y medida). Del mismo modo, con objeto de permitir el intercambio de información dentro del sistema, el estándar especifica el interfaz abstracto de servicios de comunicación (*Abstract Communication Service Interface*, ACSI) [31].

### 2.2.1. El modelo de datos IEC 61850

El estándar IEC 61850 no es sólo un estándar de comunicaciones que describe un protocolo de comunicación. Una de sus principales características es el modelado de los datos relativos a todos los elementos presentes en el sistema eléctrico tanto los relativos a los dispositivos físicos como a las funciones realizadas por éstos. El modelo definido en IEC 61850 se basa en un modelo de datos jerárquico orientado a objetos. La primera edición del estándar incluía solamente los modelos relativos a la subestación. Estos modelos fueron extendidos en posteriores ediciones de diversas partes del estándar [15]. Es más, se han desarrollado nuevos modelos para otros dominios de aplicación que han sido incluidos como nuevas partes del estándar. Entre estos modelos están aquellos relacionados con las plantas hidroeléctricas [32] y los recursos energéticos distribuidos (*Distributed Energy Resources*, DER) [33], por mencionar alguno.

Para organizar la información, el estándar se basa en un modelo jerárquico con diferentes niveles. La Figura 2.1 representa esta jerarquía. Los niveles involucrados en dicha jerarquía son servidor o dispositivo físico, dispositivo lógico (*Logical Device*, LD), nodo lógico (*Logical Node*, LN), objeto de datos (*Data Object*, DO) y atributo de datos (*Data Attribute*, DA).

El nivel superior de la jerarquía es el dispositivo físico. Este conecta el dispositivo a la red y representa el comportamiento visible exteriormente del dispositivo [33].

El segundo nivel es el dispositivo lógico. Un dispositivo físico puede tener uno o varios dispositivos lógicos. Representa la información producida y consumida por un grupo de funciones que son específicas del dominio de la aplicación [33]. El objetivo del dispositivo lógico es distinguir qué funciones están relacionadas con los diferentes dispositivos. Las funciones incluidas en un dispositivo lógico están representadas mediante los nodos lógicos.



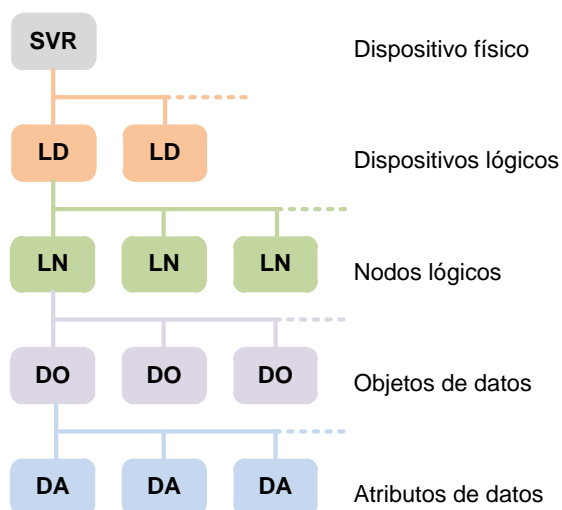


Figura 2.1. Jerarquía de objetos IEC 61850.

Los nodos lógicos constituyen el tercer nivel de la jerarquía. Un dispositivo lógico puede incluir varios nodos lógicos puesto que puede realizar varias funciones. Un nodo lógico es un objeto que agrupa datos estandarizados en función de su relación con funciones específicas de la aplicación [34]. La parte 7-4 del estándar define 19 grupos de nodos lógicos [35]. Los nombres de los nodos lógicos comienzan con el carácter que representa al grupo al cual pertenece el nodo lógico. Así, por ejemplo, los nodos lógicos relativos a aplicaciones de medida comienzan por la letra M. La Tabla 2.2 muestra algunos de estos grupos.

El siguiente nivel de la jerarquía incluye los datos relacionados con cada nodo lógico. Es el nivel de objetos de datos. Cada dato posee un nombre exclusivo determinado por el estándar, el cual está relacionado con la función que realiza en el sistema [36]. De este modo se proporciona un medio para definir información tipificada [31].

Tabla 2.2. Algunos grupos de nodos lógicos. [35]

Indicador de grupo	Grupos de nodos lógicos	Ejemplos de LN
D	DER (Distributed Energy Resources)	DPVM
G	Generic function references	GGIO
H	Hydro power	HLVL
L	System logical nodes	LLN0
M	Metering and measurement	MMXU
P	Protection functions	PDIF
Q	Power quality events detection related	QFVR
W	Wind power	WTUR
X	Switchgear	XCBR

Finalmente, el último nivel es el de los atributos de datos relacionados con cada objeto de datos. La parte 7-2 del estándar define los tipos básicos de datos estandarizados, tales como booleano, entero, real y cadena de caracteres, entre otros [31].

La parte 7-3 del estándar describe las clases de datos comunes (*Common Data Class*, CDC) que agrupan aquellos datos que comparten organización y atributos. Todos los datos relacionados con un nodo lógico pertenecen a alguna de las clases de datos definidas en el estándar. Cada clase de datos tiene un conjunto específico de atributos. Los atributos de las CDCs están agrupados en categorías. Estas categorías son las restricciones funcionales (*Functional Constrains*, FC). Todos los atributos de una CDC pertenecen a una o varias FCs [36].

### 2.2.2. Los servicios de comunicación IEC 61850

Los servicios de comunicación son un conjunto de servicios y respuestas a ellos que permiten el intercambio de información dentro del sistema y posibilitan que los diferentes dispositivos actúen de idéntica manera desde el punto de vista de comportamiento en la red. La implementación de cualquier función en el sistema se basa en el uso de los servicios definidos en el estándar IEC 61850. Los servicios se definen mediante una técnica de modelado de objetos. La parte 7-2 del estándar define el interfaz abstracto de servicios de comunicación, ACSI. El concepto de “abstracto” quiere decir que la definición de los servicios se centra en lo que proporcionan los servicios, no en cómo lo hacen [31].

El ACSI es el interfaz virtual de un IED que le proporciona servicios de comunicación abstractos, tales como conexión, acceso a variables, transferencia de datos, control de dispositivos y transferencia de ficheros independientemente de la pila de comunicaciones utilizada. El estándar define los modelos conceptuales para construir modelos específicos del dominio de la aplicación, tales como *Server*, *Logical Device*, *Logical Node* y *Data*. Por medio de éstos se especifica la información necesaria para realizar una aplicación, así como para el intercambio de información entre IEDs. El intercambio de información se define mediante los servicios. Para que los servicios abstractos de comunicación puedan ser utilizados en un sistema real deben ser mapeados a protocolos de comunicaciones. Esto se hace utilizando los mapeos específicos de servicios de comunicación (*Specific Communication Service Mapping*, SCSM) [37]. En la parte 8-1 del estándar IEC 61850 se define el mapeo de los servicios a la especificación de mensaje de fabricación (*Manufacturing Message Specification*, MMS), así como TCP/IP y Ethernet. En las partes 9-1 y 9-2 del estándar se define el mapeo a valores muestreados (*Sampled Values*, SV) sobre Ethernet [38].

La tabla 1 de la parte 7-2 del estándar lista los modelos ACSI y sus servicios asociados, tales como *reporting*, *logging*, *Generic Substation Events* (GSEs) y transmisión de valores muestreados (*Sampled Values*, SV). El modelo GSE es muy importante porque da soporte a la implementación de aplicaciones en tiempo real. Los mensajes *Generic Object-Oriented Substation Event* (GOOSE) están asociados a los servicios GSE. Los mensajes GOOSE se basan en un modelo de comunicación punto a punto. La Figura 2.2 muestra los distintos perfiles de comunicación definidos en el estándar [39].

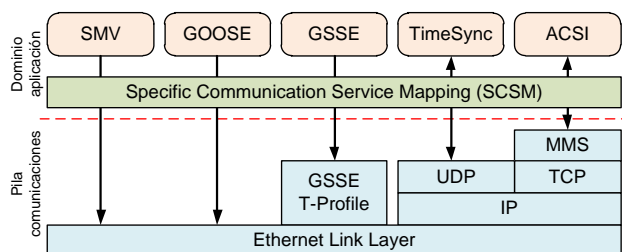


Figura 2.2. Perfiles de comunicación IEC 61850. [31]

La diferencia fundamental entre MMS por un lado, y GOOSE y SV por el otro, es que éstos últimos se basan en el mapeo directo a Ethernet, tal como se aprecia en la figura, mientras que MMS se basa en el protocolo TCP/IP. Esta diferencia hace que los mensajes GOOSE y SV sólo se puedan utilizar en el entorno de una red local, pero a cambio permiten obtener tiempos de respuesta menores, idóneos para aplicaciones críticas en el tiempo.

La parte 7-2 del estándar describe los servicios asociados con los dispositivos lógicos, nodos lógicos y *data sets*. Un *data set* es un conjunto de datos y atributos de datos agrupados para la generación de un mensaje asociado a algún evento. Los *data sets* son importantes para los diferentes servicios de comunicación, tales como *reporting*, *logging* y GOOSE. Los mensajes GOOSE permiten la transmisión de diferentes tipos de datos. Estos datos deben ser agrupados mediante *data sets*. Los datos referenciados en un *data set* deben ser conocidos tanto por el servidor como por el cliente. En este caso, sólo se necesitará transmitir el nombre del *data set* y los valores de los datos. Esto permite optimizar las comunicaciones. [31].

## 2.3. Evaluación del rendimiento

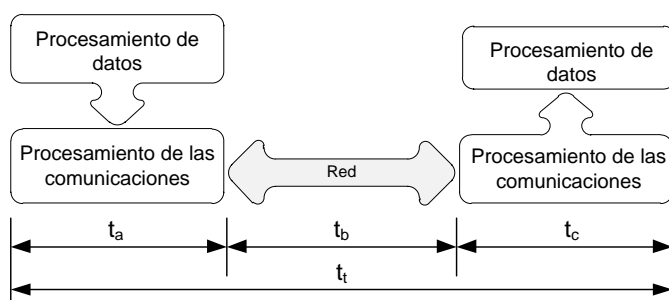
En este apartado se describe la métrica utilizada como indicador de rendimiento en las comunicaciones IEC 61850.

### 2.3.1. El tiempo de transferencia

La parte 5 del estándar especifica que para el usuario del sistema es de interés el rendimiento de las funciones locales y distribuidas. El estándar considera para el cálculo de este rendimiento la suma del tiempo de procesamiento y de comunicaciones. Así pues, según esta parte del estándar, es necesaria la definición del máximo tiempo permitido para el intercambio de datos, identificado como el tiempo de transferencia total. Este tiempo se define en el capítulo 11 de esta parte del estándar [34]. Por tanto, en este contexto, el tiempo de transferencia es la mejor elección para evaluar el rendimiento de la transmisión de datos bajo IEC 61850, en lugar de otras métricas usadas normalmente en otros ámbitos de comunicaciones.

La definición del tiempo de transferencia incluida en el estándar especifica que este contempla la transmisión completa de un mensaje, incluyendo el tiempo de procesamiento tanto en el lado del emisor como del receptor. Según esto, el tiempo de

transferencia cuenta desde el instante en el cual el emisor pone los datos a disposición de la pila de comunicaciones para su transmisión, y termina en el instante en el cual el receptor extrae los datos de su pila de comunicaciones. La figura 5 de la parte 5 del estándar [34] aclara esta definición, dividiendo el tiempo de transferencia en tres parámetros.  $t_a$  y  $t_c$  son el tiempo de procesamiento en los lados del transmisor y receptor, respectivamente, mientras que  $t_b$  es el tiempo que la red de comunicaciones necesita para transmitir los datos. El tiempo de transferencia total  $t_t$  es la suma de estos tres tiempos. La Figura 2.3 muestra estos tiempos. Según esta parte del estándar, el tiempo máximo permitido para el intercambio de información en el sistema de comunicaciones es fundamental para establecer los requisitos de rendimiento.



**Figura 2.3. Definición del tiempo de transferencia según IEC 61850-5. [34]**

El tiempo máximo de transferencia para el intercambio de información se utiliza en esta parte del estándar para clasificar los diferentes tipos de mensajes según clases de rendimiento. La tabla 1 de la parte 5 del estándar [34] lista siete clases de rendimiento según el tiempo de transferencia para aplicaciones de protección y control. Estas clases van desde la clase TT0, en la cual el máximo tiempo de transferencia puede ser mayor de 1000 ms, hasta la clase TT6, con un tiempo de transferencia de menos de 3 ms. La clase TT6, así como clase TT5, con un tiempo de transferencia menor de 10 ms, se definen para las aplicaciones más exigentes en cuanto a tiempo de respuesta.

Considerando las clases definidas para el tiempo de transferencia, en la parte 5 del estándar dichas clases de rendimiento se especifican en función de los tipos de mensajes. De este modo, se definen siete tipos de mensajes, desde los tipos 1A (“trip”) y 1B (“others”) hasta los mensajes tipo 6. Los mensajes tipo 1A son los más críticos desde el punto de vista temporal y, para ellos, el estándar define la clase de rendimiento P1, con un tiempo de transferencia menor de 3 ms (clase TT6), y la clase de rendimiento P2, con un tiempo de transferencia menor de 10 ms (TT5). Para otros mensajes rápidos, pero con menos restricciones temporales se define la clase P3, con un tiempo de transferencia menor de 10 ms (clase TT4). La Tabla 2.3 muestra las clases de rendimiento más críticas en el tiempo.

Para los mensajes de velocidad media, tipo 2, donde el tiempo de transmisión es menos crítico, se define la clase de rendimiento P4 (TT3, < 100 ms). Los mensajes de velocidad baja, tipo 3, que no son críticos en el tiempo, se definen las clases de rendimiento P5 (TT2, < 500 ms) y P6 (TT1, < 1000 ms). Otros mensajes que sí necesitan tiempos de transferencia pequeños son los relativos a datos obtenidos de transformadores de instrumentación y transductores digitales. Para estos, el estándar define las clases P7 (TT6, < 3 ms) y P8 (TT5, < 10 ms). Para otros tipos de mensajes

relacionados con la transferencia de ficheros o mensajes de comandos, se definen las clases P9 a P12 [34].

**Tabla 2.3. Clases de rendimiento más críticas y tiempos de transferencia. [34]**

Clase de rendimiento	Tiempo de transferencia	
	Clase	ms
P1	TT6	3
P2	TT5	10
P3	TT4	20

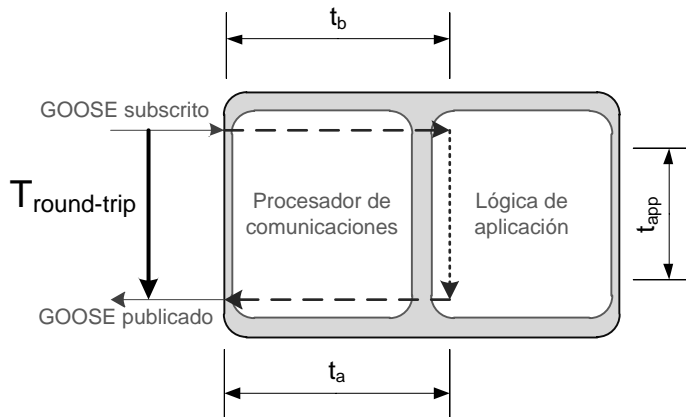
El tiempo involucrado en la comunicación entre dispositivos dentro de la subestación también ha sido especificado en otros estándares, como es el caso de IEEE Std 1646-2004 [40] e IEEE Std C37.115-2003 [41]. Ambos estándares especifican el tiempo de suministro del mensaje como indicador del rendimiento de las comunicaciones. Del mismo modo, el estándar IEEE Std 1646-2004 define los requisitos de rendimiento cualitativos para los interfaces de comunicaciones. Así, para mensajes de muy alta velocidad, el tiempo de suministro debe ser menor de 2 ms y, para mensajes de alta velocidad, el tiempo debe estar entre 2 y 10 ms.

### 2.3.2. Medición del tiempo de transferencia

A la hora de medir el rendimiento en un sistema de comunicaciones IEC 61850 en general el usuario final no tiene acceso a los datos y recursos internos de los dispositivos comerciales. Para medir el tiempo de transferencia, tal como se describe en la parte 5 de IEC 61850, esto es una dificultad. Para resolver este problema se han propuesto diversos ensayos que permiten su medición y/o estimación. Entre estos se encuentran el Round-Trip Test, el Ping-Pong test y el Rally test [42].

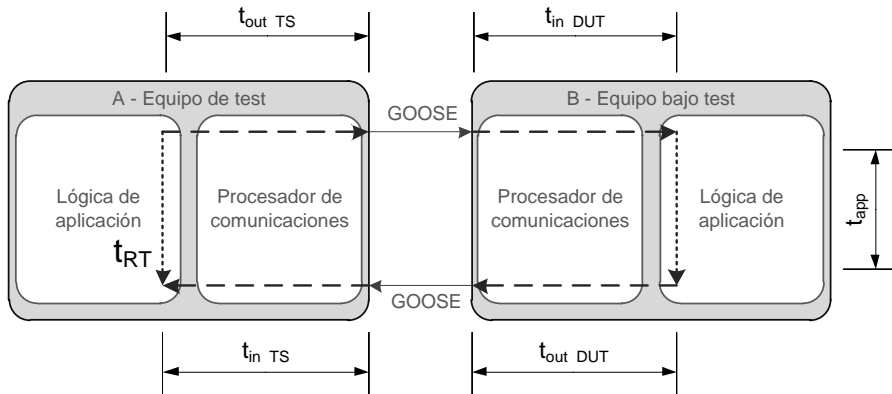
El ensayo para obtener el tiempo de Round-Trip da una medida de lo rápido que es un dispositivo [34]. Se necesita un equipo de test (*Test Set*, TS) y el dispositivo bajo test (*Device Under Test*, DUT). En este caso, el dispositivo bajo test recibe un mensaje GOOSE al cual se suscribió, lo procesa y publica otro mensaje en respuesta. El tiempo empleado desde que se recibe el mensaje GOOSE suscrito y hasta que se publica el otro mensaje proporciona el tiempo de Round-Trip  $t_{RT}$ .

El tiempo de Round-Trip (Figura 2.4) es la suma de tres tiempos,  $t_{RT} = t_b + t_{app} + t_a$ , siendo  $t_b$  el tiempo que el dispositivo necesita para recibir el mensaje suscrito. Dicho de otro modo, el tiempo que la pila de comunicaciones necesita para procesar el mensaje recibido. De modo similar,  $t_a$  es el tiempo que necesita la pila de comunicaciones para procesar el mensaje saliente.  $t_{app}$  es el tiempo relacionado con la lógica necesaria para aceptar el mensaje entrante y generar el saliente.



**Figura 2.4. Tiempo de Round-Trip.** [42]

El test de Ping-Pong (Figura 2.5) se basa en el Round-Trip Time. La idea básica es poner dos dispositivos a trabajar publicando y suscribiendo mensajes GOOSE. Esto es, un equipo de test (dispositivo A) publica un mensaje que es suscrito por el dispositivo bajo test (dispositivo B), y el dispositivo B responde publicando un mensaje que es suscrito por el dispositivo A [42].



**Figura 2.5. Test de Ping-Pong.** [42]

El Rally Test (Figura 2.6) está basado en el Ping-Pong Test. Puede ser realizado sin utilizar un dispositivo de test. En su lugar se emplean dos dispositivos bajo test. En este caso, cuando el dispositivo A recibe el mensaje suscrito que fue publicado por el dispositivo B publica otro mensaje que es suscrito por el dispositivo B. De este modo, ambos dispositivos entran en un bucle de auto excitación [42]. Los dispositivos se configuran para realizar un determinado número de bucles lo más rápido que puedan, permitiendo calcular el valor medio del Round-Trip. Aunque el Rally Test permite calcular el tiempo involucrado en la transferencia, este es sólo un valor medio que está fuertemente influenciado por factores tales como carga no periódica de la red.

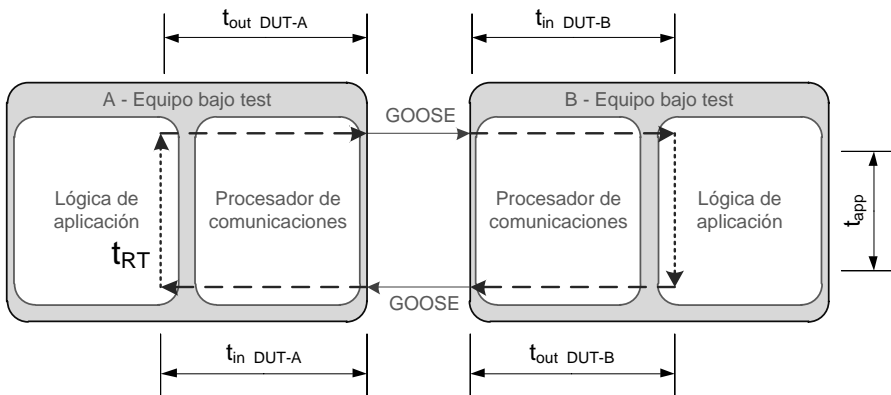


Figura 2.6. Rally test. [42]

## 2.4. Influencia de los datos

En este apartado se incluyen diversas consideraciones acerca de la influencia de los datos sobre el rendimiento de las comunicaciones IEC 61850. Hay diferentes factores relacionados con los datos a transmitir que pueden afectar directamente al tiempo de transferencia en un sistema de comunicaciones. Entre ellos, los más evidentes son los tipos de datos y la cantidad de datos a transmitir, dada su influencia directa sobre la longitud de la trama. Cada tipo de dato tiene una longitud característica en bytes y, para mayores cantidades de datos, la longitud de la trama será mayor, así como el tiempo de transferencia de la misma. Es de sobra conocido en el ámbito de las comunicaciones que a mayor longitud de trama, mayor tiempo de transmisión [43]. Algo similar debe suceder en la transmisión de datos según IEC 61850.

En el apartado 2.2.1 se describió el modelo jerárquico de datos IEC 61850. La longitud de la trama necesaria para transmitir determinada información modelada según tal estructura podría verse afectada por el modelo de datos y, por tanto, el tiempo de transferencia también se vería afectado. Las longitudes de las tramas se pueden obtener experimentalmente mediante algún analizador de redes, como es el caso de Wireshark [44]. Además, considerando el modelo de datos IEC 61850, otros aspectos pueden influir en el tiempo de transferencia, como es el caso de la ubicación de los datos en diferentes nodos lógicos, por ejemplo. En el capítulo 3 se presentan diferentes ensayos para evaluar estos aspectos.

Según el estándar IEC 61850, los datos se pueden agrupar por medio de los *data sets*. Un *data set* puede contener un único atributo de dato o diferentes datos que pertenezcan a uno o varios nodos lógicos. De este modo, un *data set* define un conjunto de referencias a datos. Los *data sets* se utilizan en IEC 61850 para leer o escribir varios objetos o atributos de datos de una vez mediante un único mensaje. IEC 61850 define servicios para *data sets* tales como *GetDataSetValues*, *SetDataSetValues*, *CreateDataSet*, *DeleteDataSet* and *GetDataSetDirectory* [31]. Los servicios *reporting*, *logging*, *GOOSE* y *SV* se basan en el concepto de los *data sets* para la transmisión de información.

Existen dos tipos de *data sets*, persistentes y no persistentes [31]. La principal diferencia entre ellos es que los *data sets* persistentes son visibles a todos los clientes y pueden ser definidos en un fichero de configuración *Substation Configuration Language* (SCL), mientras que los *data sets* no persistentes sólo son visibles al cliente que los creó.

El hecho de que varios objetos de datos y atributos pueden ser agrupados mediante *data sets* implica que la forma en la cual pueden ser agrupados puede llevarse a cabo de diversos modos, mediante diferentes *data sets*. Esta característica podría afectar directamente al rendimiento de las comunicaciones. Una adecuada elección de *data sets* podría conducir a la obtención de menores tiempos de transferencia.

La mayoría de las librerías de comunicaciones IEC 61850 disponibles basan la transmisión de datos en el concepto de *data set*. Siendo esto así, una llamada a la función que se encargue de la actualización de los datos podría generar una trama para transmitir todos los objetos de datos y atributos de datos incluidos en el *data set*. Esto debe ser tenido en cuenta cuando se definan los *data set*, con objeto de optimizar el rendimiento de las comunicaciones.

El siguiente ejemplo genérico trata de clarificar el posible efecto de la agrupación de datos mediante *data sets*. Partiendo de diez objetos de datos, estos objetos se pueden agrupar en diferente número de *data sets*, desde un *data set* que agrupe a todos los datos hasta el caso opuesto en el cual cada dato pertenece individualmente a un *data set* diferente. La Figura 2.7 muestra a modo de ejemplo algunas posibles agrupaciones.



Figura 2.7. Ejemplos de agrupación de 10 atributos de datos en diferentes *data sets*. [45]

Del mismo modo, la función encargada de la actualización de los datos para su transmisión podría ser llamada de diferentes formas, desde el caso en el cual se realizara una única llamada a la función para transmitir todos los datos, hasta el caso en el cual se realizara una llamada individual para la transmisión de cada dato, siempre y cuando la



implementación particular de la librería de comunicaciones permita esto. Estas diferentes alternativas podrían afectar al tiempo de transferencia.

La Figura 2.8 ilustra la relación entre los *data sets* y el posible uso de la función de actualización para transmitir los datos. En esta figura, se han definido diez atributos de datos (DA1 a DA10), los cuales se han agrupado en dos *data sets*, “Data\_set A” y “Data\_set B”. En la figura se han representado dos casos diferentes. En el primer caso, la transmisión de los atributos de datos DA1 y DA4 mediante llamadas individuales a las función de actualización para cada atributo de datos ha llevado a la transmisión duplicada de todos los elementos presentes en el “Data\_set A”. En el segundo caso, los atributos DA8 y DA9 se han transmitido mediante una única llamada a la función de actualización, evitando así la transmisión duplicada de información. Esto es debido a que la llamada a la función de actualización genera una trama para transmitir todos los elementos del *data set*. Por tanto, la función de actualización debe ser utilizada en base a los *data sets*, no en base a los datos individuales.

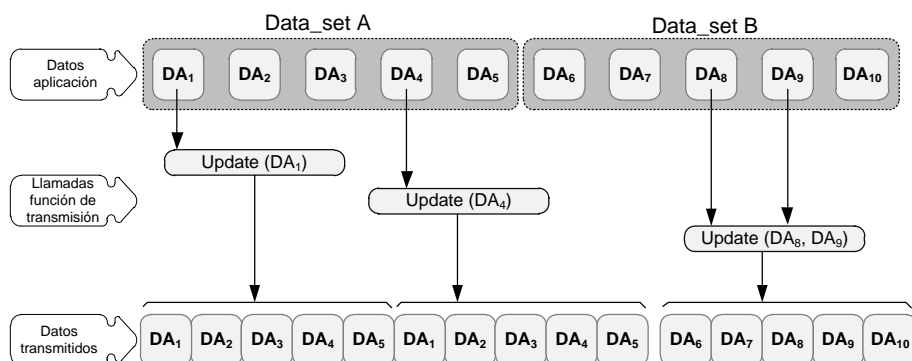


Figura 2.8. Llamadas a la función de actualización con diferentes *data sets*. [45]

## 2.5. Trabajos relacionados con la evaluación del rendimiento

En esta sección se incluye una revisión de trabajos publicados acerca de la influencia de determinados factores sobre el rendimiento de las comunicaciones según el estándar IEC 61850. La Figura 2.9 muestra algunos de los factores que pueden afectar al tiempo de transferencia y, de este modo, al rendimiento del sistema de comunicaciones IEC 61850. Algunos aspectos relacionados con la red de comunicaciones tales como la topología de la red, el tráfico y el ancho de banda han sido estudiados, simulados y analizados por diversos autores.

En [46] Engler *et al.* presentan los resultados de los ensayos destinados a evaluar el rendimiento de las comunicaciones para tres diferentes mecanismos de comunicaciones, *Sampled Values*, GOOSE y *Manufacturing Message Specification* (MMS). Para los ensayos de rendimiento con SV y GOOSE concluyen que los tiempos de transferencia aumentan cuando lo hace la cantidad de datos a transmitir. Además, en sus ensayos analizan la influencia del tráfico de la red sobre el retardo de transmisión de SVs y GOOSE.

Ito y Ohashi presentan en [42] los resultados de medir el tiempo de transferencia al transmitir mensajes GOOSE bajo diferentes condiciones de tráfico de la red. En su trabajo justifican el empleo de la técnica Ping-Pong para medir los tiempos de transferencia.

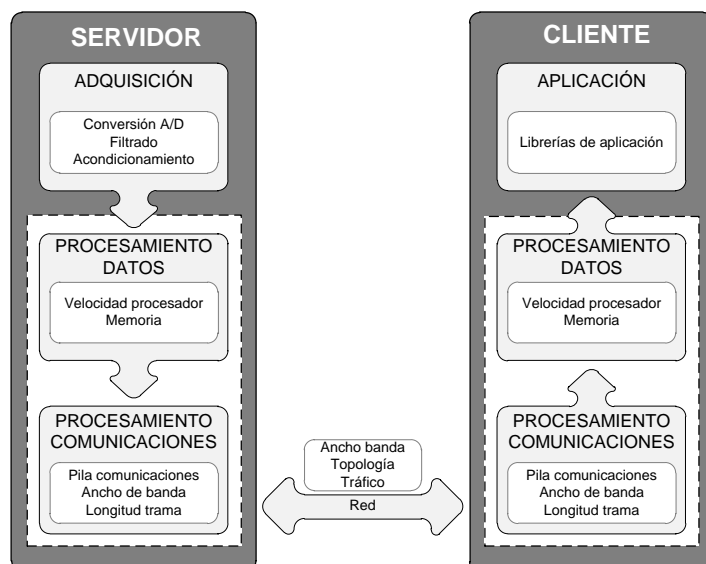


Figura 2.9. Factores que pueden afectar al tiempo de transferencia.

Ozansoy *et al.* describen en [47] el concepto de los *data sets* en el estándar IEC 61850. Igualmente describen el modelo de vista de aplicación del estándar y presentan el uso de técnicas y metodología orientada a objetos para el modelado e implementación de la vista de aplicación de los datos y *data sets*.

En [48] Bonetti y Douib describen y presentan resultados de un método práctico basado en el test de Ping-Pong para evaluar el rendimiento de la transmisión de mensajes GOOSE comparando el tiempo de teledisparo obtenido con tecnología convencional y el tiempo obtenido con mensajes GOOSE.

Steinhauser *et al.* describen en [49] el test de Round-Trip así como el test de Rally utilizados para medir el tiempo de transferencia. Del mismo modo presentan los resultados de analizar la influencia de la carga de la red sobre el rendimiento del sistema.

En [50] Haizhu *et al.* afirman que el protocolo de transmisión, la carga de la red y el modo de la misma son los principales factores que afectan a las comunicaciones en la red a nivel de proceso. Indican que entre los factores principales que afectan al retardo de transmisión están el empaquetado de los mensajes y su análisis, que están relacionados con el protocolo y modelo de transmisión. En su estudio identifican tres factores clave que afectan al retardo en la transmisión, protocolo de red, carga y estructura de la misma, y los analizan mediante simulación utilizando el entorno OPNET. Del mismo modo comparan el *Specific Communication Service Mapping* de IEC 61850 con el modelo OSI, demostrando los beneficios del primero.

Sidhu *et al.* describen en [51] el proceso de configuración de los data sets para mensajes GOOSE. Resaltan la importancia de una adecuada configuración de los data sets y presenta varios ensayos para evaluación del rendimiento de las comunicaciones con IEC 61850. En su estudio incluyen resultados del análisis de la influencia del tráfico de red, así como del marcado de prioridad y VLAN.

En [52] Georg *et al.* utilizan OPNET para simular dos escenarios diferentes de comunicaciones. Uno de ellos lo utilizan para estudiar el tráfico de red con SV y el otro con mensajes GOOSE. Bajo ambos escenarios analizan el retardo de las comunicaciones. Concluyen que los mensajes GOOSE transmitidos se ven influenciados por el tráfico asociado a los mensajes SV.

Della Giustina *et al.* consideran en [53] el tiempo de Round-Trip (RTT) como indicador de rendimiento de las comunicaciones. Analizan enlaces *Single* y *multi-hop* *Medium Voltage Broad Band Powerline* (MV-BPL) resaltando que en el análisis a largo plazo el RTT es influenciado por la topología de la red.

En [54] Fernandes *et al.* describen una configuración práctica para testear esquemas de protección así como su conformidad para los mensajes GOOSE. Al igual que otros, las medidas de rendimiento se basan en el RTT. Los ensayos que presentan se basan en el cambio de estado de señales binarias mapeadas a *data sets* GOOSE.

Yeh *et al.* ensayan en [55] con dos escenarios para medir los retardos en la comunicación GOOSE, con y sin tráfico de red. Para el primer caso se obtienen retardos menores de 1,5 ms. Al igual que otros autores, para el test de conformidad utilizan el RTT.

En [56] Netto *et al.* introducen un parámetro especial de ocupación de la red con objeto de analizar el tráfico de la red y el comportamiento de los mensajes GOOSE. Identifican la sobrecarga de la red de comunicaciones como la causa más habitual de problemas en la red. Igualmente presentan resultados de simulación con diferentes estados de ocupación del ancho de banda.

A la vista de los diferentes estudios incluidos en diversos trabajos realizados por otros autores se confirma que la mayoría de los mismos se centran en estudiar los aspectos más comunes relacionados con la red que influyen en el rendimiento de las comunicaciones IEC 61850. Sin embargo, se conoce muy poco acerca de la influencia de aquellos factores relacionados con el tiempo de procesamiento que influyen el rendimiento de las comunicaciones IEC 61850. Tan sólo se ha estudiado claramente la influencia del número de datos en los trabajos descritos por Fernandes *et al.* [54].

## **2.6. El modelo IEC 61850 para calidad de suministro**

En esta sección se incluye una revisión de trabajos publicados acerca de la aplicación del modelo de datos IEC 61850 para monitorización de parámetros relacionados con la calidad de suministro eléctrico.

En [57] Apostolov *et al.* analizan el uso del modelo de datos y servicios IEC 61850 para dar soporte a funciones de calidad de suministro, aunque no presentan resultados de aplicación del mismo.

Lloret *et al.* llevan a cabo en [58] una revisión de las posibilidades que ofrece IEC 61850 para la monitorización de parámetros de calidad de suministro eléctrico, pero sólo a nivel teórico, sin presentar resultados de implementación ni simulación.

Fuchang *et al.* describen en [59] el modelo IEC 61850 para monitorización de calidad de suministro, así como la implementación en un dispositivo basado en el software MMS-EASE Lite [60], que es un paquete de código fuente para protocolos MMS. En sus trabajos verifican la funcionalidad del sistema mediante el software IEDScout de OMICRON [61], que es una herramienta que permite analizar el funcionamiento de los IEDs y su comunicación.

En [62] Kang y Li describen el uso del modelo de datos IEC 61850 para monitorización de calidad de suministro, prestando atención al fichero de configuración SCL, pero no presentan resultados de implementación ni de verificación.

En [63] Xin propone un sistema de monitorización de calidad de suministro basado en la *model driven architecture* (MDA) y el estándar IEC 61850. Según explica, los sistemas basados en el enfoque MDA se han aplicado con éxito a muchos ámbitos, pero no se ha prestado suficiente atención al ámbito de la monitorización de calidad de suministro. Describe la relación entre MDA e IEC 61850, pero no ofrece detalles de implementación ni describe aspectos concretos del modelo IEC 61850.

Presher analiza en [64] los retos de los diseñadores de sistemas embebidos para crear sistemas en tiempo real que puedan incorporar monitorización de la calidad de suministro, medición fasorial, así como otras capacidades de análisis relacionadas con Smart Grid. En su análisis indica que una de las soluciones que se están adoptando se basa en el empleo de *field programmable gate array* (FPGA) como sucede el caso de los sistemas embebidos de *National Instruments*. Describe que los sistemas compactRIO pueden utilizar IEC 61850, pero no ofrece detalles de implementación.

Apostolov resalta en [65] el impacto de IEC 61850 en la implementación de funciones de monitorización y grabación de calidad de suministro. Describe el modelado de objetos IEC 61850 de los dispositivos para monitorización y grabación de calidad de suministro, prestando especial atención al modelo para grabación de formas de onda, que incluye nodos lógicos tales como RADR, RDRE y RBDR. Sin embargo, a la hora de abordar la verificación de estos sistemas se limita a dar una relación de las herramientas que se precisan para ello.

Yunus y Li describen en [66] una aplicación de monitorización de calidad de suministro para una subestación, basada en IEC 61850. En dicha aplicación utilizan la técnica wavelet de compresión para transmitir la forma de onda de huecos de tensión. Se centran en la descripción de la técnica basada en wavelet para detección de perturbaciones y compresión de la forma de onda para optimizar las comunicaciones. Sin embargo, no describen los recursos de IEC 61850 que utilizan.

En [67] Jia *et al.* proponen una plataforma de información de calidad de suministro (*power quality information platform*, PQIP) para la fusión de información multifuente, basada en los estándares IEC 61850 e IEC 61970. Resaltan que el factor fundamental para lograr interoperabilidad entre aplicaciones es la introducción de los modelos de datos estandarizados de IEC 61850. En la solución propuesta se utilizan los servicios de comunicación MMS de IEC 61850. A pesar de describir la arquitectura propuesta para la mencionada plataforma no describen los aspectos relacionados con el modelo de datos necesario para calidad de suministro.

Lu *et al.* presentan en [68] una solución para monitorización de la red de baja tensión en tiempo real. La solución descrita se basa en el estándar de comunicaciones IEC 61850 lo que permite lograr la interoperabilidad entre sistemas. Además de explicar los detalles de implementación de la solución descentralizada para monitorización de la red de baja tensión presentan resultados de rendimiento y funcionalidad de dos entornos reales, así como de simulación a nivel de laboratorio. En la descripción que realizan del uso del estándar IEC 61850 mencionan algunos de los nodos lógicos en los que se basan, tales como MMXU, MSTA, MMTR y MHAI. Del mismo modo mencionan algunos de los *data sets* utilizados. De los ensayos de rendimiento efectuados extraen conclusiones basadas en la comparación entre el estándar IEC 61850 y el IEC 60870-5-104.

## 3 Materiales y Métodos

Este capítulo está dividido en tres grandes apartados. En el primero se describe lo relacionado con el estudio llevado a cabo que pone de manifiesto la posible influencia de los datos sobre el tiempo de transferencia en las comunicaciones basadas en el estándar IEC 61850. Se describen tanto la configuración experimental como los métodos que se siguieron para determinar dicha influencia. El segundo apartado se dedica a la descripción de la configuración experimental y las medidas de rendimiento que se siguieron a la hora de estudiar la integración de IEC 61850 en un sistema embebido. Finalmente, el tercer apartado está dedicado a la descripción de la configuración experimental y del modelo de datos para la aplicación de IEC 61850 a un analizador experimental de calidad de suministro.

### 3.1. Estudio de la influencia de los datos

Uno de los objetivos de esta tesis es el estudio de la influencia de los datos sobre el rendimiento de las comunicaciones basadas en la norma IEC 61850. Para dicho estudio se llevaron a cabo varios ensayos de los cuales se obtuvieron los indicadores de rendimiento. Para los ensayos se utilizó la configuración experimental y metodología que se expone a continuación.

#### 3.1.1. Configuración experimental

Para estudiar la posible influencia de diversos factores relacionados con los datos sobre el rendimiento de las comunicaciones de datos se utilizó una configuración experimental intencionadamente simple. Con objeto de evitar la influencia sobre el tiempo de transferencia de otros factores que ya han sido estudiados y presentados por otros autores, tales como la topología de la red, el ancho de banda o el tráfico de red [42], [46]–[52], [54], se escogió una topología consistente en sólo dos dispositivos conectados directamente mediante un switch layer 2 Moxa PT-7710 [69]. Uno de los dispositivos actuó como servidor y el otro como cliente, en una disposición tal como la mostrada en la Figura 3.1. Con esta configuración se minimizó la influencia del tiempo de red, como se justifica más adelante.



Figura 3.1. Configuración experimental.[45]

Ambos dispositivos, cliente y servidor, se implementaron mediante la tarjeta de desarrollo DK61 del fabricante Beck IPC [70]. La tarjeta DK61 está diseñada para trabajar con el controlador integrado SC 143-IEC-LF de Beck IPC. El SC 143 es un procesador que trabaja a 96 MHz equipado con 8 MB de RAM y 8 MB de memoria Flash. Tiene dos puertos de comunicaciones Ethernet (10/100 Base T). Este procesador también está equipado con entradas y salidas digitales. Del mismo modo, lleva instalado un sistema operativo en tiempo real (*Real Time Operating System*, RTOS) que permite la ejecución de aplicaciones en tiempo real.

La tarjeta DK61 incluye como una opción la pila de comunicaciones PIS-10 de Systemcorp Embedded Technology [71]. Esta pila de comunicaciones implementa el protocolo de comunicaciones IEC 61850, dotando al procesador SC 143 de servicios IEC 61850 para las aplicaciones desarrolladas. Se implementaron dos aplicaciones, basadas en esta plataforma hardware y software asociado, para actuar una como servidor y otra como cliente, ejecutándose cada una en una placa DK61.

La pila de comunicaciones PIS-10 implementa diferentes servicios IEC 61850. Entre estos servicios se encuentran los relacionados con la transmisión de mensajes GOOSE para aplicaciones críticas en el tiempo. La Tabla 3.1 muestra algunas de las funciones disponibles para acceso a los atributos de datos.

Para la medida del rendimiento se utilizó el osciloscopio Yokogawa ScopeCorder DL850, tal como se describe en el apartado siguiente. Es un instrumento de grabación de formas de onda, modular, que puede medir tensiones, corrientes, así como otros fenómenos simultáneamente. Se caracteriza por su alta velocidad de muestreo (hasta 100 MS/s), su alta resolución (hasta 16 bits) y la capacidad de realizar medidas multicanal (hasta 128) [72].

**Tabla 3.1. Funciones de acceso a datos de PIS-10. [47]**

Módulo del API	Funciones	Servidor/Cliente
Data attribute access	IEC61850_Update()	Server
	IEC61850_ReadCallback()	Server
	IEC61850_WriteCallback()	Server
	IEC61850_UpdateCallback()	Client
	IEC61850_Read()	Client
	IEC61850_Write()	Client

### 3.1.2. Medida del rendimiento de las comunicaciones

En el apartado 2.3 se justificó la elección del tiempo de transferencia como métrica para medir el rendimiento de las comunicaciones IEC 61850 de un modo acorde a la especificación dada en la parte 5 del estándar. Por tanto, los ensayos que se realizaron basados en esta configuración experimental estuvieron enfocados a la medida de dicho tiempo de transferencia. En [73] se incluyó un estudio de algunas técnicas y procedimientos disponibles para la medición o estimación del tiempo de transferencia según la definición dada en IEC 6185. Entre estas se encuentran el Round-Trip Time, el test de Ping-Pong o el test de Rally. Además se propuso y utilizó un método basado en la activación y desactivación de señales digitales y medida de los tiempos mediante un osciloscopio. Para el objeto del trabajo desarrollado en esta tesis se escogió la medida basada en la activación y desactivación de salidas digitales en las placas DK61, midiendo las señales generadas por medio de un osciloscopio. Esto fue posible gracias a que las placas DK61 están equipadas con salidas digitales, tal como se indicó al describir sus características.

Para la medición del tiempo de transferencia de los datos se tomaron diferentes medidas, tal como se muestra en la Figura 3.2. Estas medidas están basadas en la definición del tiempo de transferencia según IEC 61850. En dicha figura,  $T_a$  representa el tiempo de procesamiento en el lado del servidor, mientras que  $T_c$  representa el tiempo de procesamiento en el lado del cliente.  $T_t$  representa el tiempo total de transmisión. Otra medida que se tomó para el análisis del tiempo de transferencia es  $T_1$  que representa el tiempo que necesita el dispositivo cliente para recibir el primer dato. Todas estas medidas proporcionaron información útil acerca de la eficiencia en la organización y gestión de los datos.

La metodología de medición se basó en la activación de una salida digital en la placa que actuó como servidor, justo en el instante anterior a la llamada a la función de actualización IEC61850\_Update (punto 1 de la Figura 3.2) y su desactivación justo después de terminada la transmisión (punto 2 de la Figura 3.2). Del mismo modo, en la placa que actuó como cliente, una salida digital se activó cuando el primer dato fue extraído de la pila de comunicaciones (punto 3 de la Figura 3.2), y fue desactivada cuando se extrajo el último dato (punto 4 de la Figura 3.2).



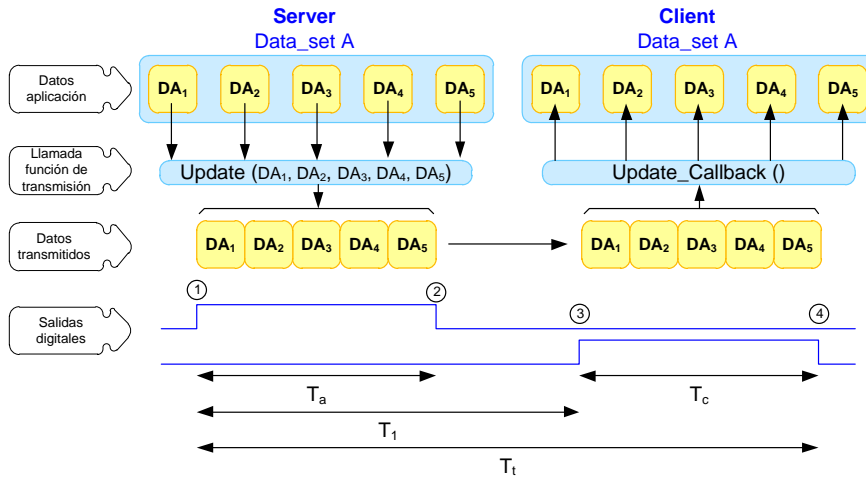


Figura 3.2. Medición de los tiempos de procesamiento y transferencia.[45]



Figura 3.3. Medición de los tiempos de procesamiento y transferencia. [45]

Para la medida de tales señales se utilizó el osciloscopio Yokogawa ScopeCorder DL850. Este es un osciloscopio que tiene la posibilidad de registrar series de muestras y aportar valores tales como los descritos. El uso de un osciloscopio para medir el tiempo de transferencia evitó la necesidad de sincronización temporal entre las placas cliente y servidor. Evidentemente, tales medidas físicas sólo pueden ser llevadas a cabo en una

configuración local tal como la descrita. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de captura de forma de onda y valores medidos.

Del mismo modo se comprobó la influencia de la activación de una salida digital. Para ello se realizó una pequeña aplicación en la cual se activó y desactivó una salida digital sin ejecución de otras instrucciones entre la activación y desactivación. Se midieron tiempos menores de 5  $\mu$ s, por lo que su influencia sobre los tiempos de transferencia medidos se consideró despreciable.

Otro de los motivos para la utilización de la configuración escogida fue que el tiempo de red  $t_b$ , tal como se describe en el estándar, fuera el menor posible. El sistema se evaluó para un ancho de banda de 100 Mbps. La transmisión se basó en el uso de tramas Ethernet con una longitud de trama de hasta 1526 bytes.

Los menores tiempos de transferencia obtenidos en los ensayos fueron de 1,650 ms para una longitud de trama de 138 bytes. En este caso, el tiempo de red  $t_b$  sería:

$$\text{Network time } t_b = \text{FrameSize} / \text{BitRate} = 138 * 8 \text{ bits} / 100 \text{ Mb} = 11 \mu\text{s} \quad (1)$$

Donde *FrameSize* es el tamaño de la trama en bits y *BitRate* es la velocidad de transmisión en Mb. De este modo, el tiempo de red calculado fue del 0,66% del tiempo de transferencia obtenido. Así pues, para este estudio, el tiempo de red pudo ser considerado despreciable.

Las aplicaciones desarrolladas para los ensayos se basaron en la librería de comunicaciones PIS-10 de Systemcorp [71]. Las aplicaciones servidor y cliente inician el correspondiente servidor o cliente en base a un fichero de configuración SCL que contiene la definición de los nodos lógicos, objetos de datos y atributos de datos necesarios para el ensayo. La Figura 3.4 muestra las principales tareas de las aplicaciones servidor y cliente que se utilizaron para los ensayos.

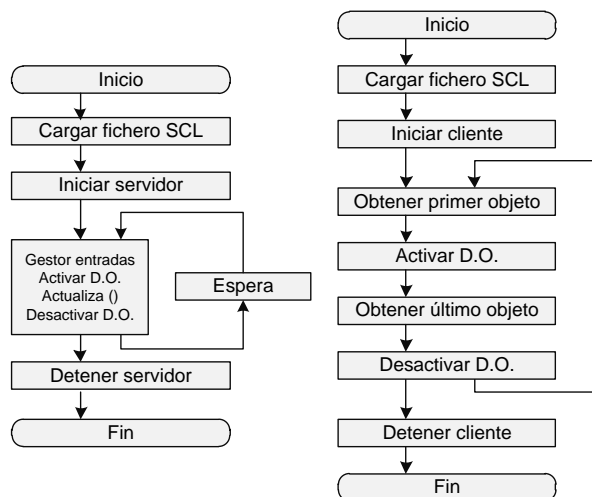


Figura 3.4. Diagrama de flujo de las aplicaciones servidor y cliente.[45]

Se realizaron cinco grupos de ensayos basados en la configuración descrita. Los parámetros relacionados con el tiempo de transferencia se midieron y almacenaron para el posterior análisis de todos los ensayos. Para cada ensayo se tomaron mil muestras de los diferentes parámetros.

Para monitorizar las tramas de los mensajes generados en los diferentes ensayos se empleó el analizador de redes Wireshark [44]. Este es un analizador de paquetes de código abierto y gratuito utilizado para análisis y resolución de problemas de redes así como para el desarrollo de software y protocolos de comunicaciones. Uno de los motivos para la elección de este software fue su capacidad de monitorizar tráfico IEC 61850. Este software permitió verificar el correcto funcionamiento de las aplicaciones desarrolladas para los ensayos, e incluso determinar las longitudes las tramas de los mensajes.

La Figura 3.5 muestra un ejemplo de un mensaje GOOSE capturado con este software. La longitud de las tramas de los mensajes depende de diversos factores entre los que se encuentra el tipo de datos a transmitir. Sin embargo hay otra serie de factores que determinan dicha longitud, como es el caso de los nombres dados a los diferentes elementos del modelo de datos IEC 61850 o a los *data sets*, entre otros. Esto es un condicionante a tener en cuenta a la hora de realizar diferentes ensayos que vayan a ser objeto de comparación entre ellos, de modo que los resultados sean coherentes y no aparezcan diferencias de tiempos por causas no imputables a los factores objeto de estudios, tal como es el tiempo de procesamiento, por ejemplo.

```
> Frame 54133: 137 bytes on wire (1096 bits), 137 bytes captured (1096 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: National_21:fd:64 (00:80:2f:21:fd:64), Dst: Iec-Tc57_01:00:01 (01:0c:cd:01:00:01)
▼ GOOSE
  APPID: 0x0000 (0)
  Length: 123
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  ▼ goosePdu
    gocbRef: SRV1LD1/LLN0$G0$GSE_CB_GOOSE
    timeAllowedtoLive: 31
    dataSet: SRV1LD1/LLN0$DS1
    goID: GSE_CB_ID
    t: Jan 19, 1970 09:20:28.195000052 UTC
    stNum: 3679
    sqNum: 0
    test: False
    confRev: 1
    ndsCom: False
    numDataSetEntries: 1
  > allData: 1 item
```

**Figura 3.5. Mensaje GOOSE capturado con Wireshark.**

Para analizar la influencia de los datos y los modelos de datos se hicieron los siguientes ensayos, cuyos resultados son descritos en el apartado 4.1: influencia del tipo de dato, del número de objetos de datos, de los *data sets* y la actualización, finalizando con la influencia del tipo de nodo lógico así como del número de nodos lógicos. Todos estos ensayos se basaron en el uso de servicios de comunicación GOOSE.

La metodología utilizada se basó en el análisis de *estadísticos de tendencia central* (*media*, *mediana* y *moda*) y de *dispersión* (*rango*, *rango intercuartil*, *desviación media absoluta*, *desviación típica*

y *varianza*), aplicados a las series de datos de mediciones experimentales obtenidas con el sistema de test, con objeto de obtener conclusiones sobre el rendimiento de la transmisión de datos. En este análisis se utilizaron también herramientas estadísticas gráficas como *histogramas* y *diagramas de caja* (*boxplots*), y se calcularon las curvas de las *funciones de densidad de probabilidad* (*fdp*) de las series utilizando *estimación no paramétrica* basada en núcleo [74]. Para obtener estos indicadores se empleó el software Microsoft Excel así como Matlab.

### 3.2. Integración de IEC 61850 en un sistema embebido

Otro de los objetivos de esta tesis es estudiar la viabilidad de integración del modelo IEC 61850 en un sistema embebido para su aplicación a sistemas en tiempo real, mediante el análisis del tiempo de transferencia como indicador de rendimiento. Para dicho estudio se llevaron a cabo varios ensayos para los que se utilizó la configuración experimental y metodología que se expone a continuación.

#### 3.2.1. Configuración experimental

Para el estudio de integración de IEC 61850 en un sistema embebido se escogió la plataforma *CompacRIO* (*cRIO*) del fabricante *National Instruments* (*NI*), ya que es la plataforma en la que se basa el analizador de calidad de suministro que se describe en el epígrafe 3.3 y al cual se pretendía aplicar el modelo de datos y las comunicaciones basadas en IEC 61850. Este fabricante dispone de diferentes modelos de controladores de automatización programables (*Programmable Automation Controller*, *PAC*). Entre las características más relevantes se pueden mencionar las siguientes:

- Consisten en un chasis reconfigurable que incluye, según el modelo, un procesador de punto flotante *PowerPC*, un procesador basado en ARM o un *System-on-Chip* (*SoC*) Intel Atom, junto a una *FPGA* programable por el usuario, por lo que están capacitados para el diseño multifuncional y el procesamiento en paralelo [75].
- Las plataformas *cRIO* se programan con el software gráfico *LabVIEW* [76], que cuenta con numerosas librerías de comunicaciones, de sistemas de potencia y de calidad del sistema eléctrico, que incluyen a su vez un amplio abanico normativo internacional. Esto permite una programación de alto nivel, tanto a nivel de sistema como a nivel de algoritmo, que resulta ideal para las funcionalidades de un IED o sistema embebido.
- Según los modelos, poseen un sistema operativo *VxWorks* en tiempo real, determinístico y confiable, permitiendo la gestión de lazos temporales críticos, pudiendo asignarles diferentes prioridades, así como el sistema operativo Linux Real-Time, basado en un kernel estándar y diseñado para una operación confiable y determinista [75].
- Utiliza también prioridades en los lazos críticos, lo cual permite garantizar la ejecución de las tareas más prioritarias en el caso de que los recursos de procesamiento se vean comprometidos.

- El sistema operativo y la programación en LabVIEW trabajan con un amplio abanico de variables, tanto locales como remotas, con capacidad de propagación del determinismo. A su vez las variables pueden ser compartidas, a nivel local o remoto; esta última opción posibilita la interacción de dos sistemas a distancia, conectados por una red de datos, actuando de forma sincronizada y determinista como uno solo.
- Disponen también de una amplia variedad de módulos de entrada/salida (E/S) intercambiables en caliente.
- Las plataformas cRIO poseen un chasis robusto, que protege al equipo frente a acciones mecánicas. Además su mecanizado permite la colocación en carril DIN y diversos soportes industriales.
- Sus dimensiones facilitan la integración en el equipamiento del sistema eléctrico.
- Por último, cumplen una amplia variedad de estándares internacionales de compatibilidad electromagnética (EMC) para uso en equipamiento eléctrico, medidas, control y laboratorio.

Para la integración del sistema de comunicaciones IEC 61850 en los controladores cRIO, National Instruments ofrece el software *NI-Industrial Communications for IEC 61850*, el cual contiene una amplia librería de instrumentos virtuales (*Virtual Instruments*, VIs) y propiedades. Mediante este software se puede usar LabVIEW para programar aplicaciones IEC 61850 en los IEDs. Entre las características que destaca el fabricante conviene mencionar la posibilidad de usar los VIs y propiedades GOOSE para publicar y suscribir mensajes GOOSE. Del mismo modo se pueden utilizar los VIs y propiedades MMS para comunicaciones de datos mediante MMS entre servidores y clientes.

Para el estudio llevado a cabo en este apartado de la tesis se pretendía medir los tiempos de transferencia para las aplicaciones más críticas, empleando para ello mensajes GOOSE. Esto condicionaba los modelos de cRIO que se podían emplear. La Tabla 3.2. muestra los productos hardware de NI soportados por su librería *NI-Industrial Communications for IEC 61850* [77].

**Tabla 3.2. Hardware soportado por NI-Industrial Communications for IEC 61850**

IEC 61850 VIs		Hardware soportado
GOOSE VIs	NI cRIO-906x y NI cRIO-903x	
MMS VIs	Todos los controladores en tiempo real NI CompactRIO y NI PXI	

Para estudiar la integración de IEC 61850 en los controladores cRIO se utilizó una configuración experimental intencionadamente simple, al igual que en el apartado 3.1. Con objeto de evitar la influencia sobre el tiempo de transferencia de otros factores que ya han sido estudiados y presentados por otros autores, tales como la topología de la red, el ancho de banda o el tráfico de red [42], [46]–[52], [54], se escogió una topología consistente en sólo dos dispositivos cRIO conectados directamente mediante un switch Moxa PT-7710. Uno de los dispositivos actuó como servidor y el otro como cliente, tal como se muestra en la Figura 3.6. En base a las restricciones indicadas en la Tabla 3.2 se

decidió utilizar los cRIO de las familias mostradas en dicha tabla capaces de enviar y recibir mensajes GOOSE, concretamente el cRIO-9066, equipado con un controlador Dual-Core de 667 MHz y FPGA Artix-7, y el cRIO-9030, equipado con un controlador con CPU Dual-Core de 1.33 GHz y FPGA 70T. Ambos controladores fueron equipados con los módulos NI-9402, de 4 canales digitales bidireccionales. Las líneas rojas de la Figura 3.6 representan la conexión ethernet entre los equipos para la transmisión de los mensajes GOOSE. La línea azul representa la conexión de salidas digitales TTL del equipo servidor a entradas digitales TTL del equipo cliente. Con esta configuración se minimizó la influencia del tiempo de red, como ya se justificó en el apartado 3.1.2.

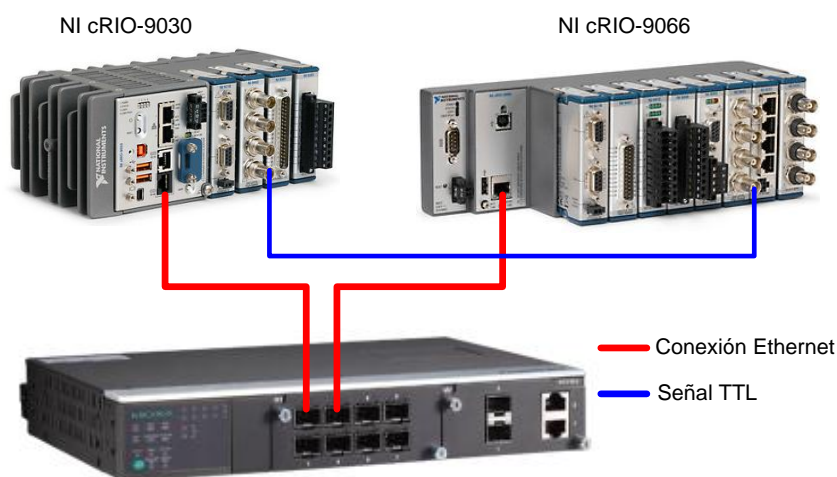


Figura 3.6. Configuración experimental.

La *NI-Industrial Communications for IEC 61850* incluye diferentes VIs y propiedades para la comunicación IEC 61850. Entre éstos se encuentran los relacionados con la transmisión de mensajes GOOSE para aplicaciones críticas en el tiempo. La Tabla 3.3 muestra los VIs disponibles para publicar y suscribir mensajes GOOSE [78].

### 3.2.2. Medidas de rendimiento

Para la medida del rendimiento se optó por seguir una técnica similar a la descrita en el apartado 3.1.2, mediante activación de señales digitales, pero sólo en el lado del servidor. Para ello se equipó a los cRIO con los módulos NI-9402. En el lado del servidor se activó una salida digital en el instante previo a la transmisión de los datos y se desactivó cuando los VIs encargados de dicha transmisión finalizaron su tarea. Esta señal digital fue cableada a una de las entradas digitales del equipo cliente. De este modo el equipo cliente, a través de la lectura de dicha entrada digital, pudo identificar el instante en el cual comenzó y finalizó el procesamiento para la transmisión de un mensaje en el lado del servidor.

Tabla 3.3. VIs para mensajes GOOSE [78].

Módulo del API	Descripción
Create GOOSE Subscriber	Crea una referencia a un subscriptor GOOSE.
Destroy GOOSE Subscriber	Destruye un subscriptor GOOSE.
GOOSE Command	Envía comandos al GOOSE control block para obtener la referencia a ciertos datos de restricción funcional (FCD) o a ciertos atributos de datos de restricción funcional (FCDA), o para obtener el valor índice de cierta FCD/FDA.
Read GOOSE	Lee la información de cabecera de un mensaje GOOSE y los valores de los puntos de datos la entrada de datos que se seleccione en el mensaje GOOSE.
Select GOOSE Entry	Selecciona la entrada de datos de acuerdo a la entrada de índice que se especifique. Una entrada de datos corresponde a los datos funcionalmente restringidos en un data set al que referencia un GOOSE control block. El GOOSE control block utiliza el índice de entrada para referenciar la entrada de dato en el data set.
Wait for GOOSE	Espera al mensaje GOOSE que el subscriptor GOOSE está buscando.

Al igual que como se describió en el apartado 3.1.2, para la medición del tiempo de transferencia de los datos se tomaron diferentes medidas, tal como se muestra en el ejemplo genérico de la Figura 3.7. Estas medidas están basadas en la definición del tiempo de transferencia según IEC 61850. En dicha figura,  $T_a$  representa el tiempo de procesamiento en el lado del servidor, mientras que  $T_c$  representa el tiempo de procesamiento en el lado del cliente.  $T_t$  representa el tiempo total de transmisión.

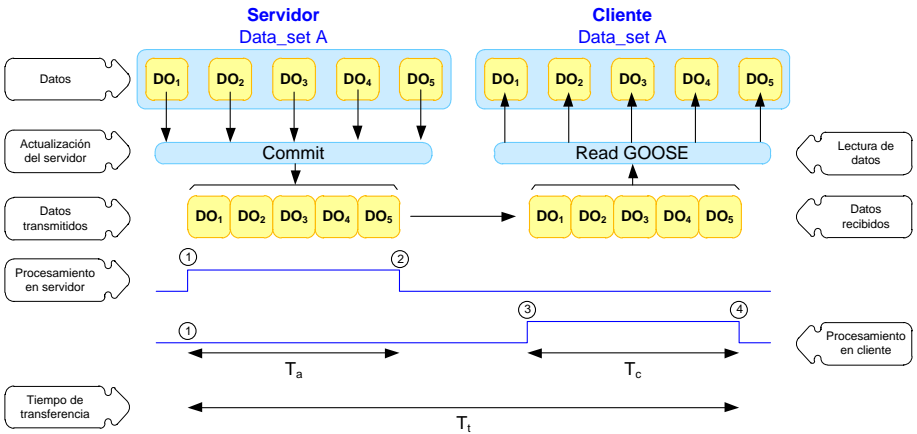


Figura 3.7. Medición de los tiempos de procesamiento y transferencia [45].

La metodología de medición se basó en la activación de una salida digital en el cRIO que actuó como servidor, justo en el instante previo al procesamiento de los datos para su publicación (punto 1 de la Figura 3.7) y su desactivación justo después de terminada la transmisión (punto 2 de la Figura 3.7). Esta señal digital fue recibida y detectada por el

cRIO que actuó como cliente. Desde el instante en el cual el cRIO cliente detectó la activación de dicha señal digital comenzó a contar el inicio del tiempo de transferencia (punto 1 de la Figura 3.7 visto desde el equipo cliente). Del mismo modo, a partir de dicho instante, el cRIO cliente se quedó en espera de recibir el mensaje GOOSE, lo cual se corresponde con el punto 3 de la Figura 3.7. Finalmente, una vez extraídos los datos del mensaje GOOSE se determinó el fin de la transmisión. Esto corresponde con el punto 4 de la Figura 3.7. De este modo, tomando las referencias temporales de estos cuatro puntos fue posible determinar el tiempo de transferencia, incluidos los tiempos de procesamiento de la transmisión en los equipos servidor y cliente.

Con objeto de extraer más conclusiones para algunos de los ensayos se tomaron otras medidas temporales no especificadas en el estándar. Estas medidas se muestran en la Figura 3.8 para un ejemplo genérico en el cual se dispone de 10 objetos de datos agrupados por parejas en un total de 5 *data sets*.  $T_1$  representa el tiempo que transcurre desde que se inicia la transmisión en el servidor hasta que el dispositivo cliente detecta la entrada del primer mensaje GOOSE (GOOSE1 en la Figura 3.8).  $T_2$  representa el tiempo empleado desde que se inicia la transmisión en el servidor hasta que el equipo cliente extrae el primer objeto de datos de su pila de comunicaciones (DO1 en la Figura 3.8).  $T_3$  mide el tiempo que transcurre desde que se inicia la transmisión en el servidor hasta que el equipo cliente extrae el primer *data set* completo de su pila de comunicaciones. Todas estas medidas proporcionaron información útil acerca de la eficiencia en la organización y gestión de los datos.

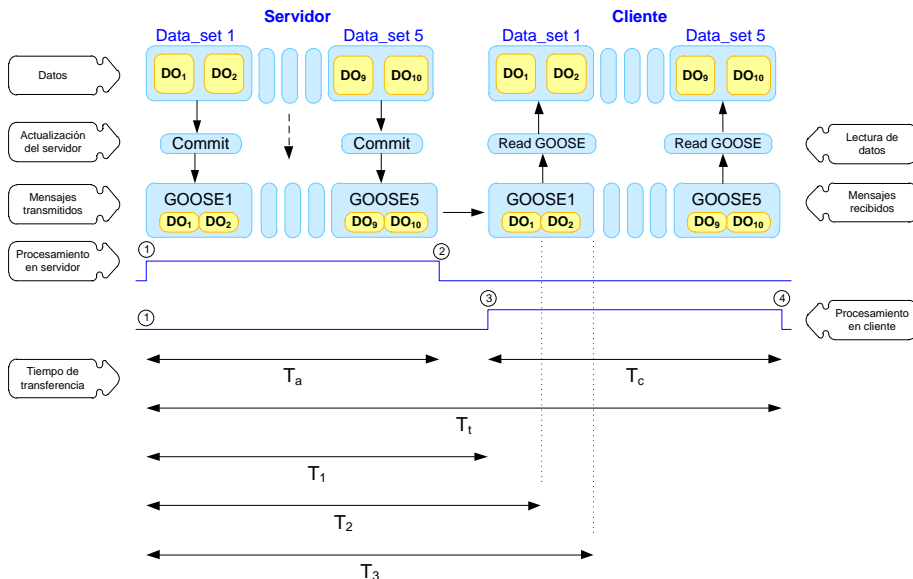


Figura 3.8. Medición de los intervalos temporales adicionales.

Las aplicaciones desarrolladas para los ensayos se basaron en la librería de comunicaciones *NI-Industrial Communications for IEC 61850* de *National Instruments* [77]. Las aplicaciones servidor y cliente inician el correspondiente servidor o cliente en base a



un fichero de configuración SCL que contiene la definición de los nodos lógicos, objetos de datos y atributos de datos necesarios para el ensayo.

Se diseñaron diferentes versiones de las aplicaciones servidor y cliente para los ensayos que se realizaron, aunque todas se basaron en la misma estructura. Las aplicaciones que actuaron de servidor se basaron en una estructura secuencial de LabView (*Flat sequence*) que permitió organizar la secuencia de operaciones a realizar. Así pues, estas aplicaciones contenían cuatro marcos o *frames*. El primero es el que se destinó a la preparación de los parámetros necesarios para ejecutar el ensayo seleccionado. Entre estos parámetros destaca el nombre del fichero SCL que contenía la definición de los nodos lógicos, objetos de datos y atributos de datos necesarios para el ensayo en curso. El segundo *frame* se encargó de ejecutar la creación del Publisher en función de los parámetros seleccionados para el ensayo, así como de la apertura de un fichero separado por comas para almacenar los resultados de duración del tiempo de procesamiento en el servidor. El tercer *frame* se dedicó a la generación periódica de las tramas de mensajes GOOSE acordes con el ensayo a realizar. El último *frame* fue el encargado de cerrar las referencias y ficheros abiertos una vez que finalizó la ejecución de la aplicación. La Figura 3.9 ilustra el algoritmo general que dio lugar a la estructura de las aplicaciones servidor.

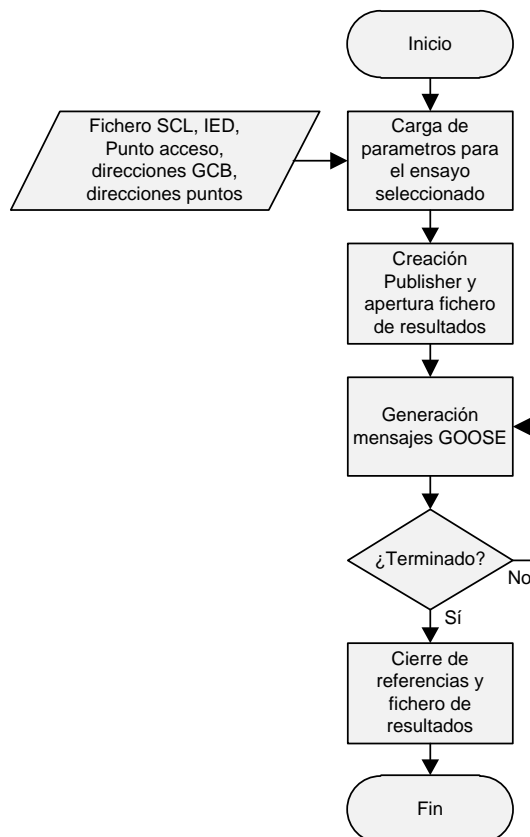


Figura 3.9. Algoritmo general de las aplicaciones servidor.

De esta secuencia de operaciones, la más relevante para los ensayos es la que se encargó de la generación de los mensajes GOOSE. Para ello se optó por implementar una estructura de lazo temporizado (*Timed Loop*) que permitiera la transmisión periódica de los mensajes. En el seno de dicha estructura se realizaron cuatro tareas fundamentales. La primera fue la activación de una salida digital que permitiera que el cRIO servidor informara al cRIO cliente de que se iba a iniciar la transmisión de un nuevo mensaje GOOSE. La segunda tarea fue la modificación de los valores de los objetos de datos a transmitir y su actualización en el servidor, lo que provocaba la generación y envío del mensaje GOOSE correspondiente. Posteriormente, una vez concluido el envío del mensaje, se desactivó la salida digital. Por último, se procedió a almacenar los valores del tiempo de procesamiento en el fichero de resultados. Esta estructura se programó para el envío periódico de mensajes cada 500 milisegundos. La Figura 3.10 muestra el algoritmo en que se basó el envío periódico de mensajes GOOSE.

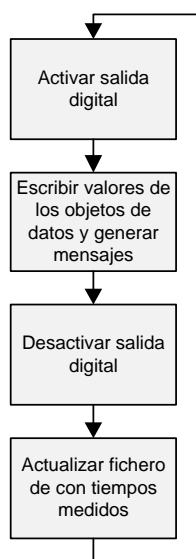
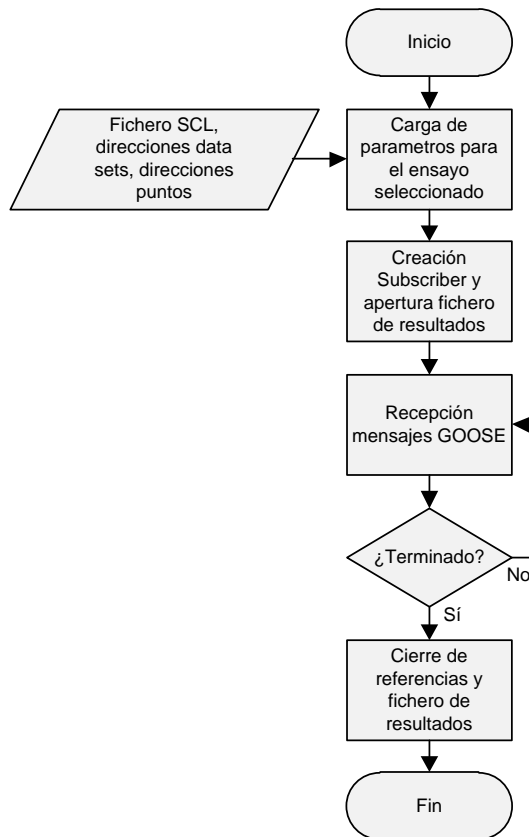


Figura 3.10. Algoritmo general de generación de mensajes GOOSE.

Las aplicaciones que actuaron como cliente también se basaron en una estructura secuencial de LabVIEW, tal como se muestra en la Figura 3.11. Así pues, estas aplicaciones contenían cuatro marcos o *frames*. El primero fue el que se destinó a la preparación de los parámetros necesarios para ejecutar el ensayo seleccionado. Entre estos parámetros destacaba el nombre del fichero SCL que contenía la definición de los nodos lógicos, objetos de datos y atributos de datos necesarios para el ensayo en curso. El segundo *frame* se encargó de ejecutar la creación del *Subscriber* en función de los parámetros seleccionados para el ensayo, así como de la apertura de un fichero separado por comas para almacenar los resultados de las medidas de tiempo efectuadas en el lado del cliente. El tercer *frame* se dedicó a la recepción de las tramas de mensajes GOOSE. Para esta tarea se implementó una máquina de estados, tal como se describe a

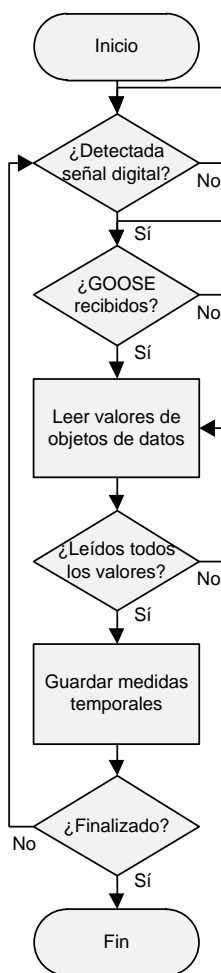
continuación. El último *frame* fue el encargado de cerrar las referencias y ficheros abiertos una vez que finalizó la ejecución de la aplicación.



**Figura 3.11. Algoritmo general de las aplicaciones cliente.**

De esta secuencia de operaciones, la más relevante para los ensayos es la que se encargó de la recepción de los mensajes GOOSE. Para ello se optó por implementar una máquina de estados. La máquina de estados se implementó mediante la estructura Timed Loop de LabView. Se definieron tres estados: “EsperaDO”, “EsperaGOOSE” y “GrabaTiempos”. El estado “EsperaDO” se encargó de esperar el valor TRUE en la entrada digital que proviene de la salida digital que activa el cRIO servidor. La detección de esta señal digital implicó que el equipo servidor había iniciado una transmisión, por lo que la máquina de estados evolucionaba al siguiente estado, “EsperaGOOSE”. En el segundo estado, el equipo cliente estaba a la espera de la recepción de los mensajes GOOSE a los que se había suscrito, en función de los parámetros de configuración que caracterizaron a cada ensayo. En este estado, una vez que se detectó un mensaje GOOSE, se procedió a la lectura de los valores de los objetos de datos, actualizando de este modo las variables correspondientes en el equipo cliente. Una vez finalizada la recepción de todos los valores de objetos de datos, el sistema pasaba al siguiente estado, “GrabaTiempos”. En este último estado se almacenaron, en el fichero separado por comas, todos aquellos valores de tiempo que se habían registrado y habían sido

calculados tomando como punto de referencia la detección de la señal de entrada digital. Una vez almacenados dichos valores, si se habían recibido el número de mensajes esperado, se finalizaba la ejecución de la máquina de estados. En caso contrario, se volvía al estado inicial, “EsperaDO”. Esta estructura se programó con una fuente interna de sincronismo de 1 MHz, un periodo de 50  $\mu$ s y una prioridad de 100. La Figura 3.12 muestra el algoritmo en que se basó la máquina de estados para la recepción de mensajes GOOSE.



**Figura 3.12.** Algoritmo de la máquina de estados.

Se realizaron tres grupos de ensayos basados en la configuración descrita. Los parámetros relacionados con el tiempo de transferencia se midieron y almacenaron para el posterior análisis de todos los ensayos. Para cada ensayo se tomaron mil muestras de los diferentes parámetros. Para extraer las primeras conclusiones, se determinaron los valores medios de las magnitudes medidas. Posteriormente se calcularon estadísticos de tendencia central y de dispersión.

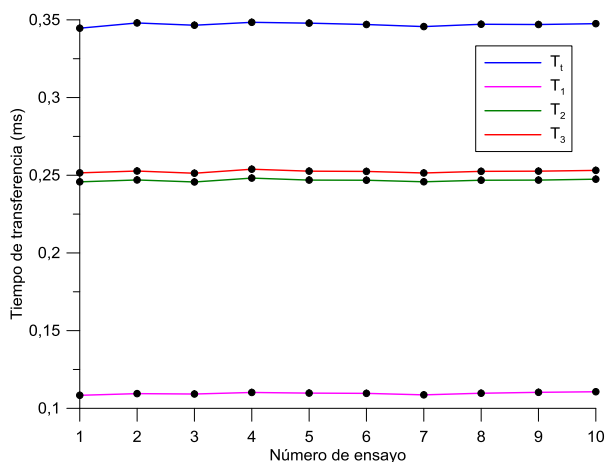
Para analizar la influencia de los datos y los modelos de datos se hicieron los siguientes ensayos, cuyos resultados se describen en el apartado 4.2: influencia del número de objetos de datos, de los *data sets* y la función de actualización, finalizando con la influencia del tipo de nodo lógico. Todos estos ensayos se basaron en el uso de servicios de comunicación GOOSE.

Con objeto de verificar la estabilidad de los ensayos se repitió un mismo ensayo bajo las mismas condiciones diez veces. La Tabla 3.4 y la Figura 3.13 muestran los valores obtenidos para los tiempos de transferencia. Se obtuvieron desviaciones estándar del orden del microsegundo.

**Tabla 3.4. Estabilidad de las mediciones en un mismo tipo de ensayo.**

Ensayo	T <sub>t</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	0,344623	0,108358	0,245743	0,251526
2	0,348015	0,109456	0,246965	0,252696
3	0,346547	0,109203	0,245669	0,251289
4	0,34841	0,110223	0,248167	0,253874
5	0,347857	0,109797	0,246886	0,252611
6	0,347016	0,10962	0,246772	0,252446
7	0,345667	0,108684	0,24579	0,251469
8	0,347161	0,109723	0,246773	0,252508
9	0,347001	0,110305	0,246884	0,252614
10	0,347545	0,110654	0,247448	0,253121
<b>Desviación estándar</b>	0,001140	0,000715	0,000793	0,000799

(\*) Medidas expresadas en milisegundos (ms).



**Figura 3.13. Estabilidad de las mediciones en un mismo tipo de ensayo.**

La metodología utilizada se basó en el análisis de *estadísticos de tendencia central* (*media, mediana y moda*) y de *dispersión* (*rango, rango intercuartil, desviación media absoluta, desviación típica y varianza*), aplicados a las series de datos de mediciones experimentales obtenidas con el sistema de test, con objeto de obtener conclusiones sobre el rendimiento de la transmisión de datos. En este análisis se utilizaron también herramientas estadísticas gráficas como *histogramas* y *diagramas de caja* (*boxplots*), y se calcularon las curvas de las *funciones de densidad de probabilidad* (*fdp*) de las series utilizando *estimación no paramétrica* basada en núcleo [74]. Para obtener estos indicadores se empleó tanto el software Microsoft Excel así como Matlab.

### 3.2.3. Integración de IEC 61850 en controladores basados en VxWorks

Uno de los inconvenientes que se encontró a la hora de estudiar y analizar la influencia de los factores relacionados con los datos en los controladores programables cRIO cuyo sistema operativo no era Linux-RT, sino VxWorks, fue la imposibilidad de utilizar los servicios de comunicación GOOSE.

En el comienzo de los diferentes trabajos abordados en esta tesis, una vez estudiada y analizada la influencia de los factores que afectan al rendimiento de las comunicaciones IEC 61850 empleando la plataforma DK61 junto con la librería PIS-10, se planteó la integración del estándar en los controladores programables cRIO. En aquel momento no existía aún la librería de comunicaciones industriales de *National Instruments*, por lo que se pensó diseñar un módulo específico para los controladores cRIO que incorporara el controlador SC-143 de Beck-IPC junto con la librería PIS-10. Así pues, con este objetivo se desarrolló una versión preliminar de módulo de comunicaciones que permitiera evaluar la viabilidad de integración descrita.

Para el desarrollo de módulos específicos para los controladores cRIO, *National Instruments* dispone de un kit de desarrollo, el cRIO-9951 Module Development Kit (MDK) [79]. Con este kit de desarrollo es posible diseñar módulos personalizados para la serie C. Los módulos desarrollados con la ayuda de este kit tienen los mismos requerimientos que los módulos desarrollados por NI. La Figura 3.14 muestra el contenido del MDK en donde se puede ver una carcasa típica de los módulos de la serie C, así como un par de conectores de los que se pueden utilizar en los desarrollos.

Dentro de la carcasa de los módulos de la serie C se encuentra una placa de circuito impreso (*Printed Circuit Board*, PCB) que incorpora los componentes necesarios para el acondicionamiento y captura de señales, así como para la comunicación de datos con el controlador cRIO. El desarrollador es el encargado de diseñar e implementar la PCB que satisfaga los requerimientos de su aplicación, mediante el uso de circuitería específica para el acondicionamiento y captura de aquellos tipos de entradas/salidas que se precisen [79].

La Figura 3.15 muestra un ejemplo de PCB diseñada para un módulo de la serie C. En ella se aprecia el conector frontal, específico de la aplicación y el conector trasero, tipo D-SUB de 15 pines, necesario para la conexión al chasis del cRIO.



Figura 3.14. Module Development Kit (MDK). [79]

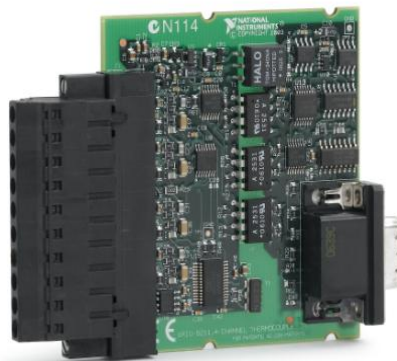


Figura 3.15. PCB de un módulo de la serie C. [79]

La PCB desarrollada debe incluir una memoria EEPROM para almacenar información de identificación del módulo (ID del fabricante, ID del producto y número de serie), así como posibles datos de calibración del mismo. El interfaz de módulos soporta dos modos de comunicación entre el controlador cRIO y los módulos individuales: modo ID (*ID mode*) y modo comunicación (*communication mode*). El modo ID se utiliza para acceder a la EEPROM. Una vez identificado el módulo, se pasa al modo comunicación, que se emplea para establecer la comunicación con la circuitería de entrada/salida del módulo. El interfaz de módulo define once líneas de señal, dos de las cuales tienen funcionalidad fija predefinida. Las nueve restantes cambian dependiendo del modo de comunicación [79].

A través de las líneas de interfaz con el módulo se pueden establecer dos tipos de comunicación: SPI o paralelo. Mediante la comunicación SPI se accederá a la EEPROM

y, si el módulo lo requiere, a la circuitería de entrada/salida. Mediante la comunicación paralelo se puede acceder directamente a la circuitería de entrada/salida.

Los módulos de la serie C deben soportar inserción en caliente, de modo que se pueden conectar y desconectar con el cRIO funcionando.

Además del desarrollo del hardware del módulo y de programar la EEPROM, hay que diseñar un VI driver para el mismo, que definirá la funcionalidad del módulo. El desarrollador de módulos personalizados debe desarrollar los VI driver de modo que abstraigan al programador de la FPGA de la complejidad específica del módulo.

Resumiendo, la creación de un módulo serie C implica dos aspectos principales:

- Desarrollo del hardware y programación de la EEPROM.
- Creación del driver para el módulo.

Así pues, para el objetivo que se planteó en esta fase de la tesis hubo que diseñar una PCB con el MDK para su conexión a la plataforma de desarrollo DK61 con la librería PIS-10. Del mismo modo se tuvo que desarrollar el driver correspondiente para comprobar la funcionalidad básica. Para el diseño de la PCB se empleó el software Multisim de *National Instruments* [80].

### **3.3. Integración de IEC 61850 en un analizador de calidad de suministro**

En este apartado se describe la propuesta de aplicación del modelo de comunicaciones IEC 61850 a un PQA para su utilización con los inversores de una planta fotovoltaica experimental como parte de los trabajos desarrollados en el grupo de investigación TIC-240 de la Universidad de Córdoba, en el marco del proyecto PV-ONTIME, “Sistema inteligente de producción, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica on-time”.

#### **3.3.1. Configuración experimental**

Para el desarrollo del PQA objeto de este estudio se escogió la plataforma cRIO de *National Instruments*. Este tipo de controladores permiten, en combinación con el software LabVIEW RT, el desarrollo del sistema en un entorno real, capaz de integrar las tecnologías de procesamiento y comunicación requeridas.

Para las pruebas de funcionamiento del modelo de datos propuesto se emplearon los mismos controladores cRIO que se emplearon en los ensayos descritos en el apartado 3.2.

Tal como se definió en la introducción, el PQA que se planteó para los primeros estudios estaba integrado por dos bloques fundamentales, el sistema de medición/detección y el sistema de comunicaciones. Puesto que el sistema de medición ya fue implementado en los desarrollos correspondientes del proyecto PV-ONTIME, y que para la fase preliminar del estudio que aborda esta tesis eran de interés las



magnitudes y parámetros relacionados con la aplicación para su integración en el modelo de datos IEC 61850, se optó por realizar los primeros ensayos de validez del modelo a nivel de laboratorio, mediante simulación de las señales eléctricas.

Se configuró el sistema para efectuar medidas de los parámetros de continua a la entrada del inversor y de los parámetros de alterna a su salida. Del mismo modo, se escogió la detección de cambios rápidos de tensión, en concreto de huecos de tensión a la salida del inversor, como parámetro fundamental para medir la calidad de suministro. La Figura 3.16 muestra una vista conceptual del sistema objeto de estudio.

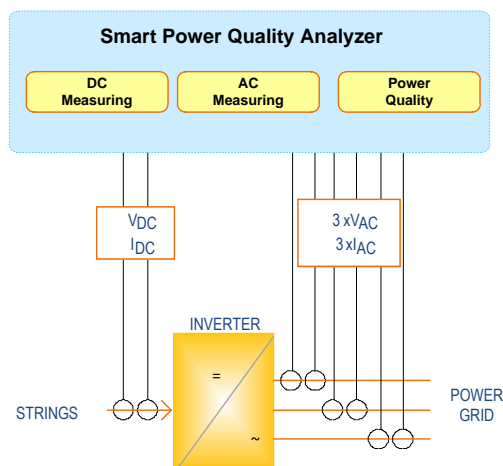


Figura 3.16. Vista conceptual del SPQA.

Para la implementación del sistema de medición/detección se utilizó la librería *LabView Electrical Power Suite* (EPS) de *National Instruments*. Esta librería incluye los recursos necesarios para la obtención de los valores característicos de una aplicación de medida, así como de calidad de suministro. Sin embargo, tal como se ha descrito anteriormente, el objetivo principal de esta parte de la investigación era la integración del modelo definido por el estándar IEC 61850. Para ello, la estructura de datos del PQA se basó en el modelo jerárquico de datos definido por IEC 61850. El apartado 7-4 de IEC 61850 define los nodos lógicos apropiados para asociar a los datos relativos a medidas de continua, alterna y de calidad de suministro [35]. La Figura 3.17 esquematiza la relación entre las librerías de la EPS de NI y el modelo de datos IEC 61850. Esta relación se establece a través del fichero de configuración SCL, que determina, entre otros aspectos, qué nodos lógicos se emplean para contener cada una de las variables propias de la aplicación.

La aplicación desarrollada se basó en la utilización de la paleta "*Power Quality VIs*" que emplea VIs de tensión, corriente y frecuencia. Esta paleta incluye cuatro objetos, tal como se muestra en la Tabla 3.5.

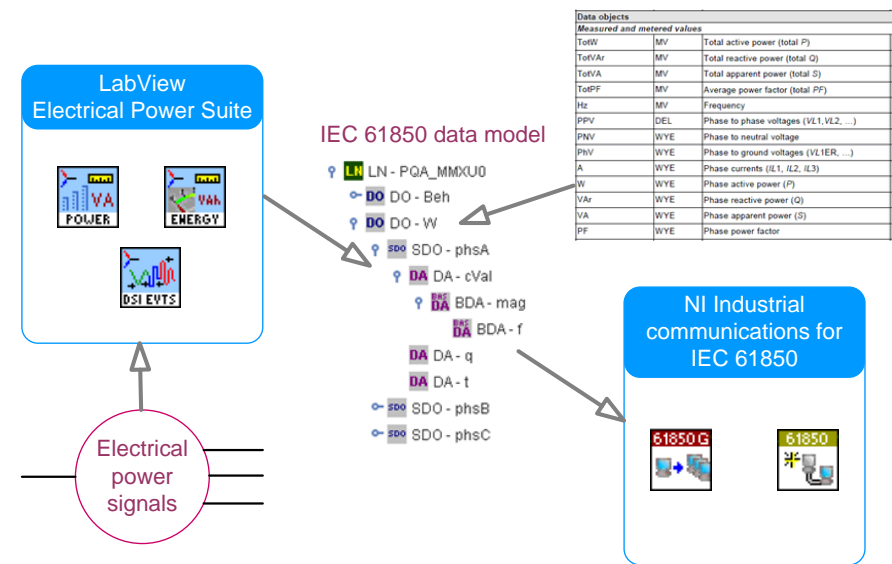


Figura 3.17. Esquema del proceso.

Tabla 3.5. VIs de tensión, corriente y frecuencia.

Objetos de la paleta	Descripción
Deviation	Calcula la desviación respect a los valores RMS de tensión de 10/12 ciclos. Se puede utilizar el VI RMS (10 or 12 Cycles) para calcular los valores RMS de tensión.
Frequency (Half Cycle)	Calcula la frecuencia de medio, uno y 10/12 ciclos de una forma de onda de tensión o corriente, utilizando los cruces por cero.
RMS (10 or 12 Cycles)	Calcula el valor RMS de tensión o corriente de un espectro complejo para un bloque de 10/12 ciclos, de acuerdo a IEC 61000-4-30:2008.
RMS (Half Cycle)	Calcula la tensión o corriente RMS para un bloque de medio/un ciclo, utilizando los cruces por cero.

Tabla 3.6. VIs de potencia y energía.

Objetos de la paleta	Descripción
Energy Values	Calcula los valores de energía para una longitud de intervalo especificada. Este VI devuelve los valores de energía aparente, activa y reactiva.
Fundamental Power Values (1 Cycle)	Calcula los valores de potencia de la fundamental desde el espectro de tensión o corriente para un bloque de un ciclo.
Power Values	Calcula los valores de potencia para el espectro de tensión y corriente para diferentes configuraciones de línea.

En cuanto a los valores de potencia y energía, la aplicación desarrollada se basó en el uso de la paleta “*Power & Energy VIs*”. Esta paleta dispone de tres objetos, tal como se muestra en la Tabla 3.6.

Respecto a los valores de calidad de suministro, la aplicación desarrollada se basó en el uso de la paleta “*Power Quality VIs*”. Esta paleta incluye, a su vez, la subpaleta “*Events VIs*”, la cual dispone de dos objetos, tal como se muestra en la Tabla 3.7

**Tabla 3.7. VIs de calidad de suministro.**

Objetos de la paleta	Descripción
Rapid Voltage Changes	Detecta cambios rápidos de tensión RMS entre dos condiciones de estado estacionario según IEC 61000-4-30:2008.
Voltage Dips, Swells, and Interruptions	Detecta huecos, sobretensiones e interrupciones de la tensión RMS de acuerdo a IEC 61000-4-30:2008.

El PQA para el cual se planteó esta investigación está definido en el contexto del proyecto PV-ONTIME. Para dicho proyecto es fundamental un tiempo de respuesta adecuado a la aplicación. Así pues, se considera esencial una sincronización estable para garantizar una marcación precisa de los instantes en que se producen los eventos. Además, si este sistema de sincronismo es común para los equipos presentes en una red de distribución se garantizaría una posible toma de decisión coordinada [81].

Para ello se optó por utilizar el sistema de sincronismo marcado por el protocolo de tiempo de precisión (*Precision Time Protocol*, PTP). De esta forma, si el sistema ejecuta varios hilos en paralelo, se asegura un alto nivel de determinismo para los lazos más críticos.

Otro de los aspectos de relevancia en este sistema es el hecho de lograr una comunicación en tiempo real entre los dispositivos que pueda garantizar los tiempos actuación de las funciones de protección. De aquí la importancia de una adecuada selección de los servicios de comunicación.

Tal como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal de esta parte de la investigación era la integración del modelo de datos definido por el estándar IEC 61850, para lo cual hay que establecer una relación entre los parámetros y magnitudes eléctricas de la aplicación y la estructura de datos equivalente acorde con el modelo jerárquico de datos definido por IEC 61850. Dentro de este modelo jerárquico, el elemento fundamental es el nodo lógico, tal como se describió en el apartado 2.2. De los nodos lógicos definidos en la parte 7-4 del estándar IEC 61850 hubo que hacer una adecuada selección acorde con las necesidades de representación de la información. La Tabla 3.8 lista los principales nodos lógicos que se necesitaron para este fin, así como el grupo al que pertenecen.

La estructura de información basada en estos nodos lógicos tuvo que ser definida mediante un fichero de configuración SCL.

**Tabla 3.8. Nodos lógicos necesarios para las magnitudes del PQA.**

Nodo Lógico	Descripción	Grupo
MMDC	DC measurement	M
MMXU	Measurement	M
MMTR	Metering	M
QVVR	Voltage variation	Q
QVTR	Voltage transient	Q

### 3.3.2. Verificación de funcionamiento

Con objeto de verificar la validez del sistema propuesto, se plantearon diferentes pruebas de funcionamiento, consistentes en simular cambios en las magnitudes características del PQA y verificar que dichos cambios eran recibidos y mostrados en el equipo que actuó como cliente.

Para satisfacer los objetivos del estudio que aborda esta tesis se propuso verificar que se podían transmitir adecuadamente los siguientes fenómenos:

- Variación de tensión continua.
- Variación de corriente continua.
- Variación de tensión alterna.
- Variación de corriente alterna.
- Variación de valores de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia.
- Variación de valores de energía activa, reactiva y aparente.
- Huecos de tensión.
- Transitorios de tensión.



## 4 Resultados y Discusión

Se exponen aquí los resultados obtenidos de los ensayos realizados para analizar la influencia de factores relacionados con los datos sobre el tiempo de transferencia en las comunicaciones IEC 61850. Del mismo modo se incluyen los resultados obtenidos de la integración del estándar en un sistema embebido. Finaliza el capítulo con los resultados de la aplicación del modelo de datos IEC 61850 a un analizador experimental de calidad de suministro eléctrico.

### 4.1. Estudio de factores que afectan al tiempo de procesamiento

En este apartado se incluyen los resultados de los ensayos realizados para estudiar la influencia de determinados factores relacionados con los datos sobre el tiempo de procesamiento en las comunicaciones IEC 61850. Los resultados mostrados en este apartado se corresponden con los ensayos realizados con la plataforma hardware DK61 de Beck IPC y la librería de comunicaciones PIS-10 de Systemcorp Embedded Technology. Se muestran los resultados correspondientes a los siguientes ensayos:

- Estudio de la influencia de los tipos de datos
- Estudio de la influencia del número de objetos de datos
- Estudio de la influencia de los *data sets* y su actualización
- Estudio de la influencia del tipo de nodo lógico
- Estudio de la influencia del número de nodos lógicos

Tal como se expuso en el apartado 3.1, la metodología seguida en estas pruebas, desde el punto de vista del procesamiento de los datos resultados de las mismas, se ha basado en el análisis por medio de estadísticos de tendencia central y de dispersión, y para la interpretación de los resultados se han empleado herramientas estadísticas gráficas como histogramas, funciones de densidad de probabilidad y diagramas de caja (*boxplots*).

4.1.1. Estudio de la influencia de los tipos de datos

El objetivo de este estudio fue verificar la influencia del tipo de datos sobre el tiempo de transferencia. Este es un factor que se esperaba que influyera sobre el tiempo de transferencia, debido a que cada dato tiene una determinada longitud en bytes que afecta directamente a la longitud de la trama mediante la cual se transmite y, por tanto, al tiempo de transferencia.

Se realizaron dos grupos de ensayos. Los ensayos de cada grupo se diferenciaron variando el tipo del dato a transmitir. Para el primer grupo se transmitió un único dato en cada ensayo. Para este grupo se llevaron a cabo nueve ensayos variando el tipo de objetos de datos. Para el segundo grupo se realizaron ocho ensayos, ya que la transmisión de diez objetos tipo VISSTR255 implicaba una longitud de trama mayor de la permitida. Para cada ensayo los objetos de datos fueron incluidos en un único nodo lógico tipo *Generic Process I/O* (GGIO). La Tabla 4.1 muestra un resumen de las características de los ensayos.

Tabla 4.1. Resumen del estudio con tipos de datos.

Estudio	Influencia del tipo datos
Objetivo	Determinar influencia del tipo de datos en el tiempo de transferencia
Tipo de datos	BOOL, INT8, INT16, INT32, FLOAT32, FLOAT 64, VISSTR32, VISSTR64, VISSTR255
Tipo de nodo lógico	GGIO
Número de datos	1 y 10
Número de data sets	1
Número de ensayos	17
Número de medidas	1000

4.1.1.1. Transmisión de un dato

La Tabla 4.2 muestra los resultados del primer grupo de ensayos. Para este grupo, cada dato fue referenciado mediante su propio *data set* (un *data set* exclusivo para el dato a transmitir). Del mismo modo, la función de actualización fue llamada una vez para cada dato a transmitir. En la mayoría de los casos las longitudes en bytes de los datos bajo estudio presentaban muy pocas diferencias y los tiempos de transferencia fueron muy similares.

La Figura 4.1 muestra gráficamente la serie temporal de medidas del tiempo de transferencia obtenido al transmitir un dato tipo booleano (BOOL), así como el diagrama de cajas, histograma y la función de densidad correspondiente.

Tabla 4.2. Influencia del tipo de dato al transmitir un objeto de datos.

Tipo dato	Tamaño trama	$T_t$	$T_a$	$T_c$	$T_l$
BOOL	138	1,650	1,115	0,005	1,644
INT8	138	1,657	1,123	0,005	1,651
INT16	139	1,673	1,133	0,004	1,667
INT32	140	1,689	1,142	0,004	1,683
FLOAT32	142	1,691	1,137	0,005	1,685
FLOAT64	146	1,702	1,152	0,005	1,696
VISSTR32	170	1,685	1,141	0,005	1,680
VISSTR64	202	1,712	1,158	0,005	1,706
VISSTR255	397	1,884	1,270	0,005	1,878

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

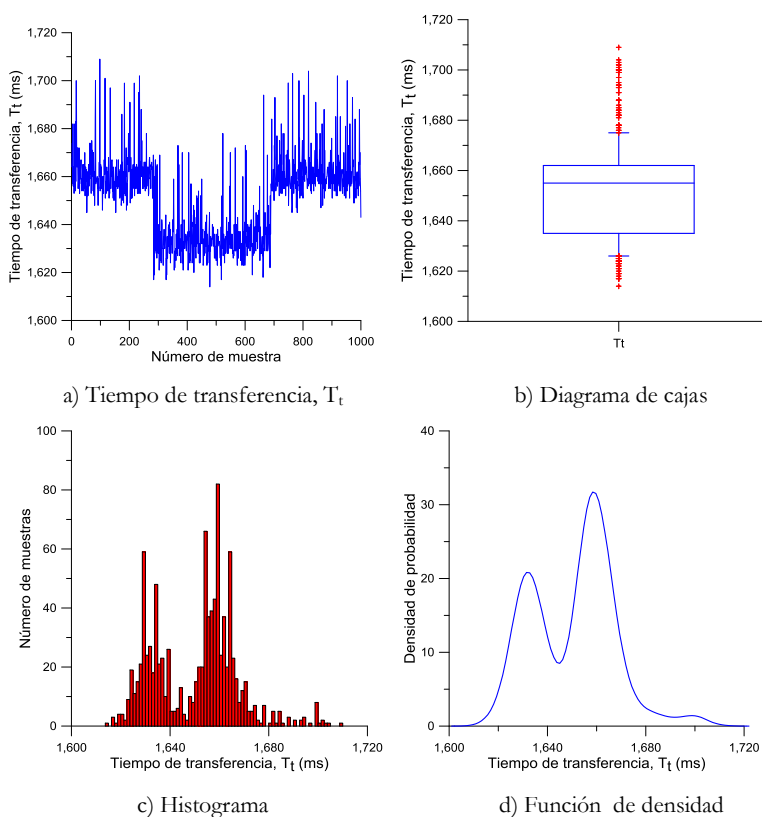
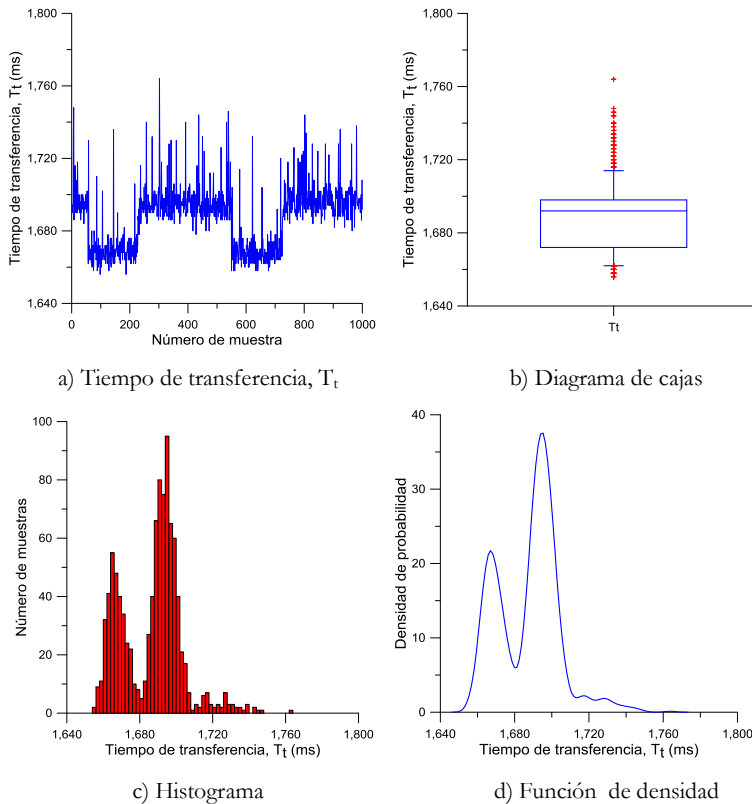


Figura 4.1. Transferencia de un dato tipo BOOL.

Del mismo modo, y con objeto de establecer una comparativa que permita extraer conclusiones, en la Figura 4.2 se muestra la serie temporal de medidas del tiempo de transferencia obtenido al transmitir un dato tipo INT32, así como el diagrama de cajas, histograma y función de densidad correspondiente para este tipo de dato.





**Figura 4.2. Transferencia de un dato tipo INT32.**

La Figura 4.3 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los nueve ensayos.

Analizando los resultados mostrados desde la Figura 4.1 a la Figura 4.3, se observan patrones similares, con pequeñas variaciones de unos a otros. El resultado más relevante que se puede extraer de esta comparativa es el comportamiento bimodal que se aprecia. Para todos los ensayos la mayoría de los valores medidos se agruparon en torno a dos valores centrales.

La Figura 4.4 representa, combinadas sobre una misma gráfica, las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los nueve ensayos del primer grupo. En ella se puede observar que presentan distribuciones similares que se diferencian fundamentalmente en el tiempo de transferencia propio de cada tipo de dato, destacando que para el tipo de dato VISSTR255 se incrementa considerablemente respecto a los obtenidos para los otros tipos de datos, debido a la mayor longitud en bytes de la trama que se genera.

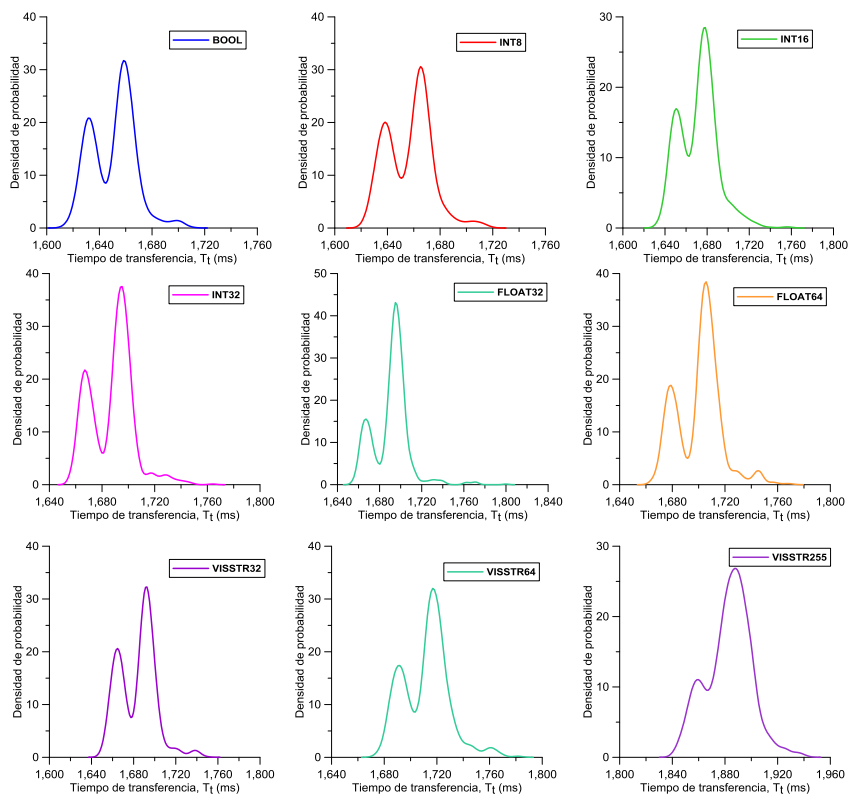


Figura 4.3. Funciones de densidad de  $T_t$  al transmitir un dato variando su tipo.

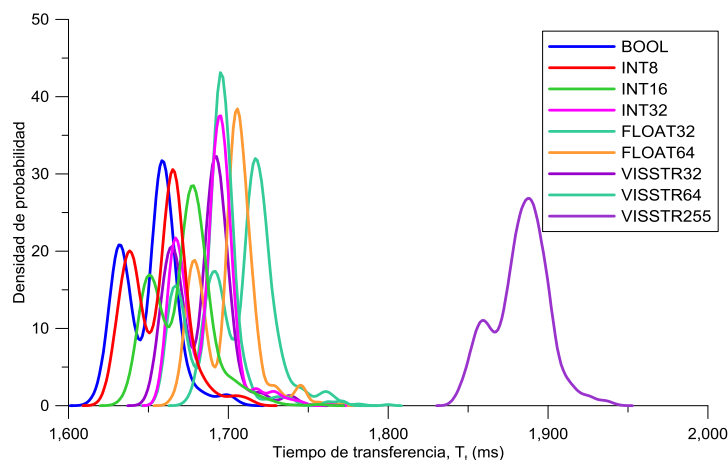


Figura 4.4. Comparativa de las funciones de densidad de  $T_t$  según el tipo de datos.

La Figura 4.5 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los nueve ensayos del primer grupo. En esta

gráfica se aprecia, en general, una tendencia ascendente en el tiempo de transferencia cuando aumenta el tamaño de los tipos de datos a transmitir.

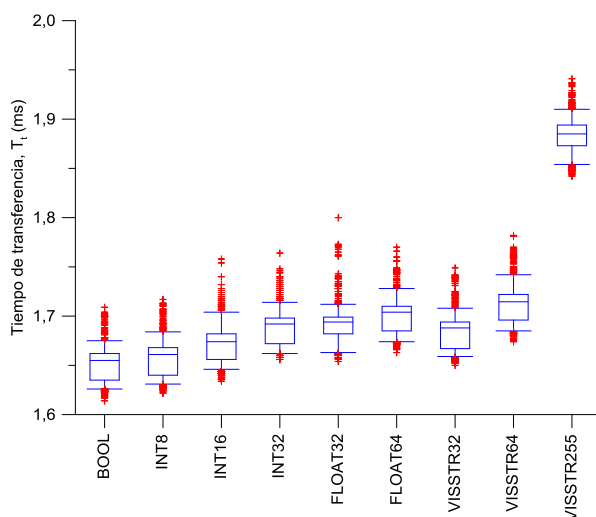


Figura 4.5. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  según el tipo de datos.

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.3 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos.

Tabla 4.3. Valores estadísticos de la influencia del tipo de datos sobre  $T_t$

	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Mín)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
BOOL	1,650	1,655	1,660	0,095	0,027	0,014000	0,016757	0,000281
INT8	1,657	1,661	1,666	0,095	0,028	0,014443	0,017348	0,000301
INT16	1,673	1,674	1,678	0,124	0,026	0,014307	0,018157	0,000330
INT32	1,689	1,692	1,696	0,108	0,026	0,013341	0,016614	0,000276
FLOAT32	1,691	1,694	1,695	0,146	0,017	0,012221	0,017140	0,000294
FLOAT64	1,702	1,704	1,704	0,107	0,025	0,013072	0,016965	0,000288
VISSTR32	1,685	1,688	1,692	0,099	0,027	0,014378	0,017336	0,000301
VISSTR64	1,712	1,715	1,716	0,108	0,026	0,013791	0,017677	0,000312
VISSTR255	1,884	1,885	1,890	0,099	0,021	0,013300	0,016994	0,000289
* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms <sup>2</sup> )								

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza ( $ms^2$ )

#### 4.1.1.2. Transmisión de diez datos

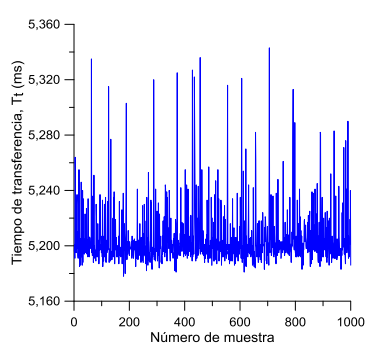
Para el segundo grupo de ensayos se transmitieron diez datos del mismo tipo, todos agrupados bajo el mismo *data set*. La Tabla 4.4 muestra los resultados de este segundo grupo de ensayos, donde se observa claramente la influencia del tipo de dato. Al igual que en el grupo de ensayos anterior, la función de actualización fue llamada sólo una vez para cada grupo de datos a transmitir.

**Tabla 4.4. Influencia del tipo de dato al transmitir 10 objetos de datos.**

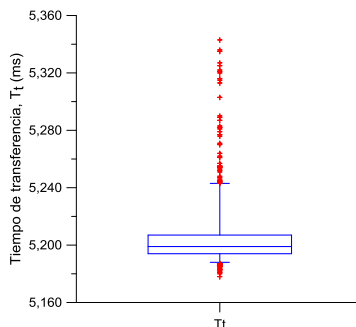
Tipo dato	Tamaño trama	$T_t$	$T_a$	$T_c$	$T_l$
BOOL	168	4,831	3,888	1,639	3,178
INT8	168	4,886	3,923	1,665	3,208
INT16	174	5,018	4,015	1,710	3,295
INT32	184	5,205	4,134	1,771	3,421
FLOAT32	204	5,172	4,062	1,788	3,374
FLOAT64	244	5,288	4,204	1,759	3,513
VISSTR32	477	5,135	4,097	1,707	3,411
VISSTR64	797	5,406	4,273	1,773	3,612

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

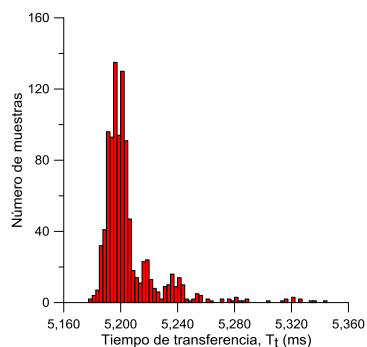
\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.



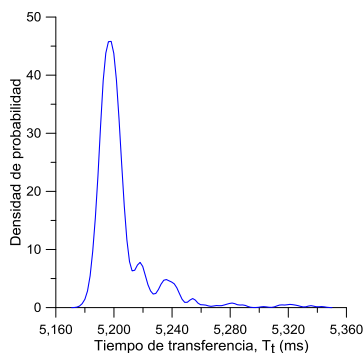
a) Tiempo de transferencia,  $T_t$



b) Diagrama de cajas



c) Histograma



d) Función de densidad

**Figura 4.6. Transferencia de diez datos tipo INT32.**

Con objeto de establecer una comparativa que permita extraer conclusiones, en la Figura 4.6 se muestra la serie temporal de medidas del tiempo de transferencia obtenido al transmitir diez datos tipo INT32, así como el diagrama de cajas, histograma y función de densidad correspondiente para este tipo de dato.

La Figura 4.7 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los ocho ensayos del segundo grupo.

Analizando los resultados mostrados en la Figura 4.6 así como en la Figura 4.7 se observan patrones similares, con pequeñas variaciones de unos a otros. Sin embargo, si se comparan con las funciones de densidad que se obtuvieron en el caso de transmitir un único dato, se observa que el tiempo de transferencia  $T_t$  no presenta un comportamiento bimodal.

La Figura 4.8 representa, combinadas sobre una misma gráfica, las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los ocho ensayos del segundo grupo. En ella se puede observar que presentan distribuciones similares que se diferencian fundamentalmente en el tiempo de transferencia propio de cada tipo de dato.

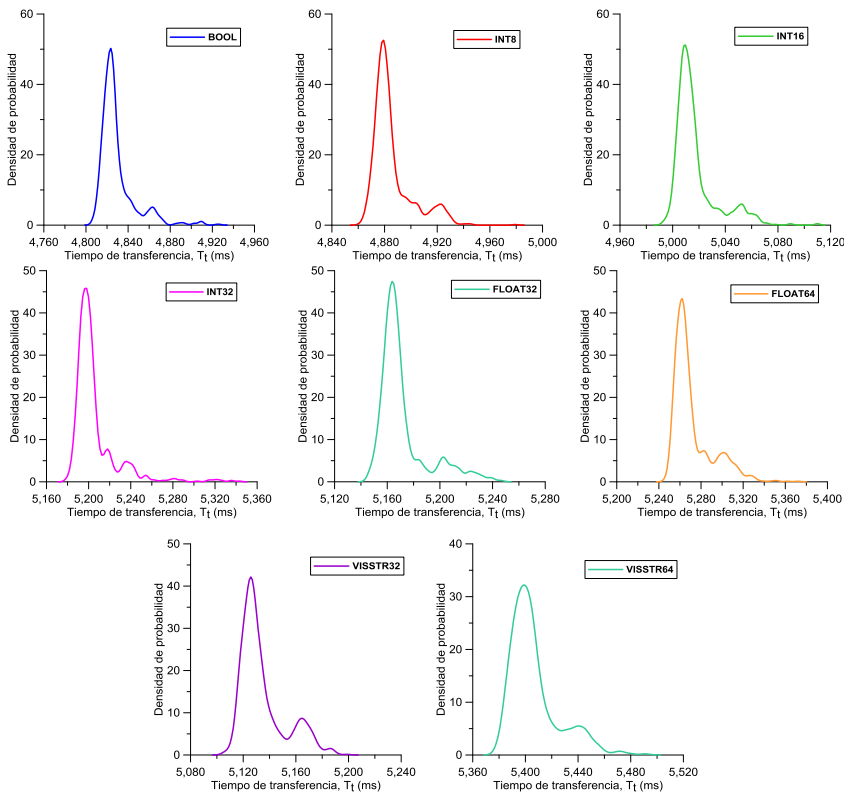


Figura 4.7. Funciones de densidad de  $T_t$  al transmitir diez datos variando su tipo.

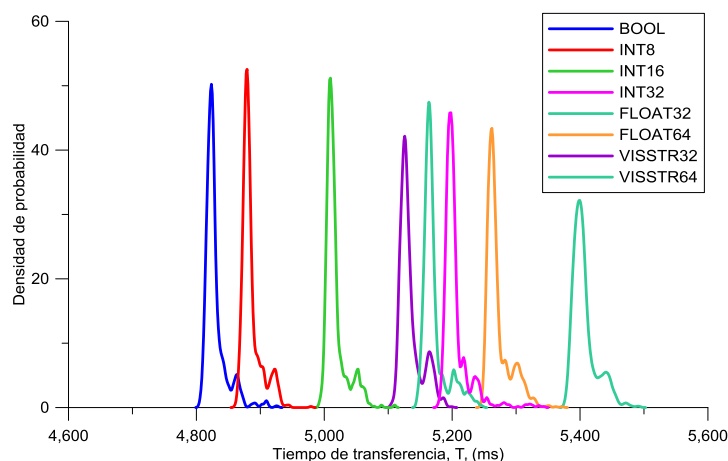


Figura 4.8. Comparativa de las funciones de densidad de  $T_t$  según el tipo de datos.

La Figura 4.9 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los ocho ensayos del segundo grupo. En esta gráfica se aprecia, en general, una tendencia ascendente en el tiempo de transferencia cuando aumenta la longitud en bytes de los tipos de datos a transmitir.

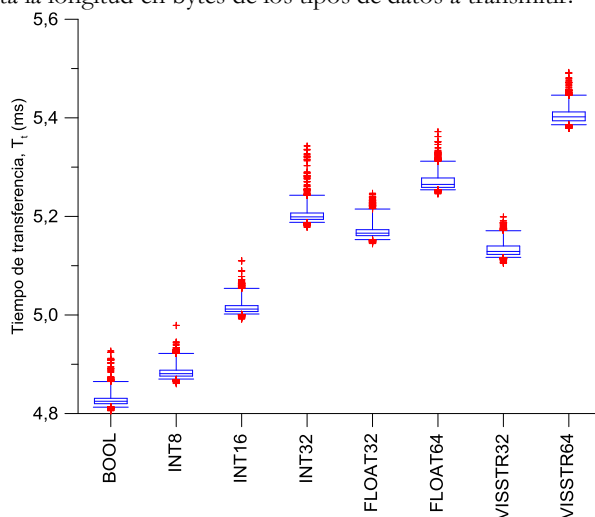


Figura 4.9. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  para diez datos según su tipo.

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.5 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos del segundo grupo.

Tabla 4.5. Valores estadísticos de la influencia del tipo de datos sobre  $T_t$ 

	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Mín)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
BOOL	4,831	4,825	4,825	0,121	0,011	0,011304	0,016801	0,000282
INT8	4,886	4,881	4,879	0,118	0,012	0,011207	0,015291	0,000234
INT16	5,018	5,012	5,007	0,118	0,012	0,011438	0,016156	0,000261
INT32	5,205	5,199	5,201	0,165	0,013	0,013385	0,021165	0,000448
FLOAT32	5,172	5,166	5,164	0,102	0,012	0,013372	0,018712	0,000350
FLOAT64	5,288	5,265	5,260	0,126	0,019	0,014503	0,018992	0,000361
VISSTR32	5,135	5,129	5,125	0,094	0,017	0,013265	0,017137	0,000294
VISSTR64	5,406	5,402	5,392	0,113	0,018	0,013880	0,018665	0,000348

Nota: Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms<sup>2</sup>)

La Figura 4.10 muestra la evolución de los valores medios obtenidos para el tiempo de transferencia  $T_t$  en ambos grupos de ensayos. Comparando esta gráfica con la Figura 4.5 y la Figura 4.9 se pueden obtener las mismas conclusiones, por lo que la gráfica de valores medios puede ser una buena elección para extraer conclusiones preliminares.

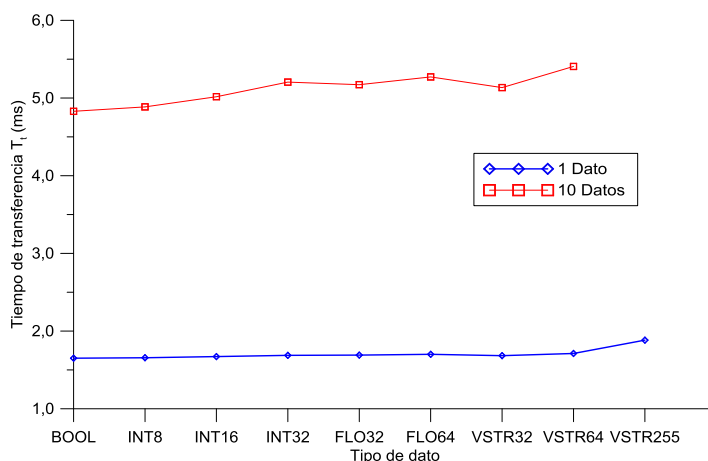


Figura 4.10. Influencia del tipo de dato sobre el tiempo de transferencia.

Se observó un comportamiento no lineal en los ensayos. Una trama correspondiente a un dato tipo FLOAT64, con una longitud de trama de 146 bytes dio lugar a un tiempo medio de transferencia de 1,702 ms, mientras que una trama correspondiente a un dato tipo VISSTR32, cuya longitud de trama es de 170 bytes, implicó un tiempo medio de transferencia de 1,685 ms, menor que el obtenido para la trama del dato tipo FLOAT64. Puesto que este era un resultado no esperado se repitió el mismo ensayo, obteniendo siempre los mismos valores medios. Esto llevó a descubrir que el tiempo de

procesamiento empleado por la pila de comunicaciones para un dato de tipo cadena como es VISSTR32 es menor que el obtenido con algunos tipos de datos cuyo tamaño en bytes es menor, como es el caso del dato tipo FLOAT64.

#### 4.1.2. Estudio de la influencia del número de objetos de datos

El objetivo de este estudio fue verificar la influencia del número de objetos de datos sobre el tiempo de transferencia. Este es un factor que se esperaba que influyera claramente sobre el tiempo de transferencia, debido a que este número afectaba directamente a la longitud de las tramas de mensajes.

Se realizaron diez ensayos variando el número de objetos de datos, todos tipo BOOL, desde uno hasta diez. Para cada ensayo, todos los objetos de datos fueron incluidos en un único nodo lógico tipo GGIO. La Tabla 4.6 muestra un resumen de las características de los ensayos.

**Tabla 4.6. Resumen del estudio con número de datos.**

<b>Estudio</b>	Influencia del número de objetos de datos
<b>Objetivo</b>	Determinar influencia del número de datos en el tiempo de transferencia
<b>Tipo de datos</b>	BOOL
<b>Tipo de nodo lógico</b>	GGIO
<b>Número de datos</b>	De 1 a 10
<b>Número de data sets</b>	1
<b>Número de ensayos</b>	10
<b>Número de medidas</b>	1000

La Tabla 4.7 muestra los grupos de datos que se ensayaron y las magnitudes medidas. Para este estudio interesaba conocer fundamentalmente los valores del tiempo de transferencia total,  $T_t$ . El primer ensayo se realizó para un único dato, el segundo para dos datos BOOL y así sucesivamente. Todos los objetos de datos fueron incluidos en el mismo nodo lógico.

**Tabla 4.7. Influencia del número de objetos de datos.**

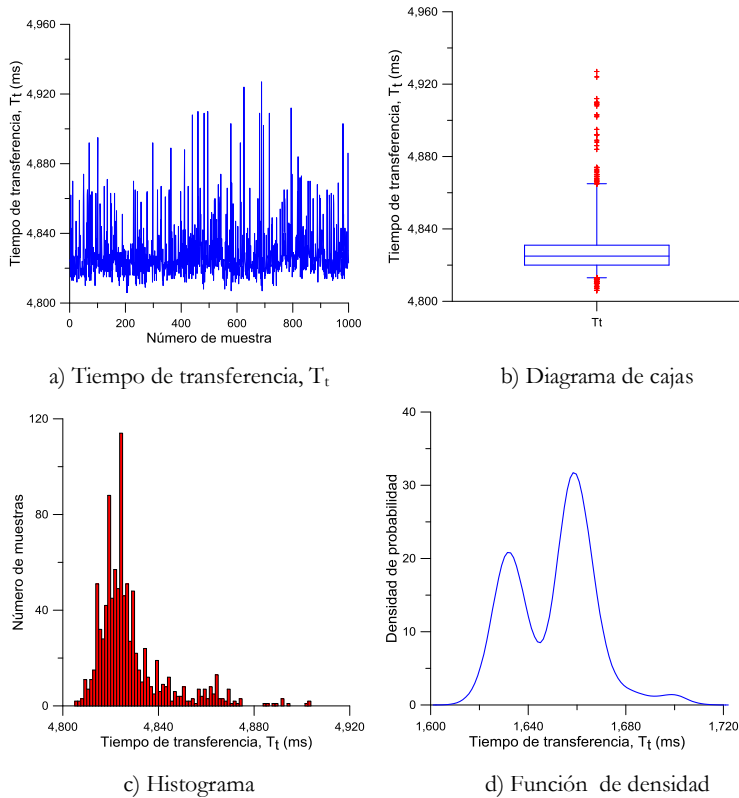
Número datos	Tamaño trama	$T_t$	$T_a$	$T_c$	$T_l$
1	138	1,650	1,115	0,005	1,644
2	143	1,963	1,387	0,179	1,783
3	146	2,317	1,821	0,381	1,927
4	149	2,655	2,167	0,566	2,078
5	152	2,959	2,257	0,713	2,236
6	155	3,345	2,879	0,930	2,402
7	159	3,709	3,137	1,112	2,586
8	162	4,074	3,506	1,288	2,770
9	165	4,439	3,739	1,467	2,955
10	168	4,829	3,887	1,652	3,178

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.



La Figura 4.11 muestra gráficamente la serie temporal de medidas del tiempo de transferencia obtenido al transmitir diez datos tipo BOOL, así como el diagrama de cajas, histograma y función de densidad correspondiente. Las gráficas correspondientes a la transmisión de un dato tipo BOOL se mostraron en la Figura 4.1. A partir de estas dos figuras ya pueden extraerse algunas conclusiones.



**Figura 4.11. Transferencia de diez datos tipo BOOL.**

La Figura 4.12 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los diez ensayos. La Figura 4.13 muestra, combinadas sobre una misma gráfica, las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para estos diez ensayos.

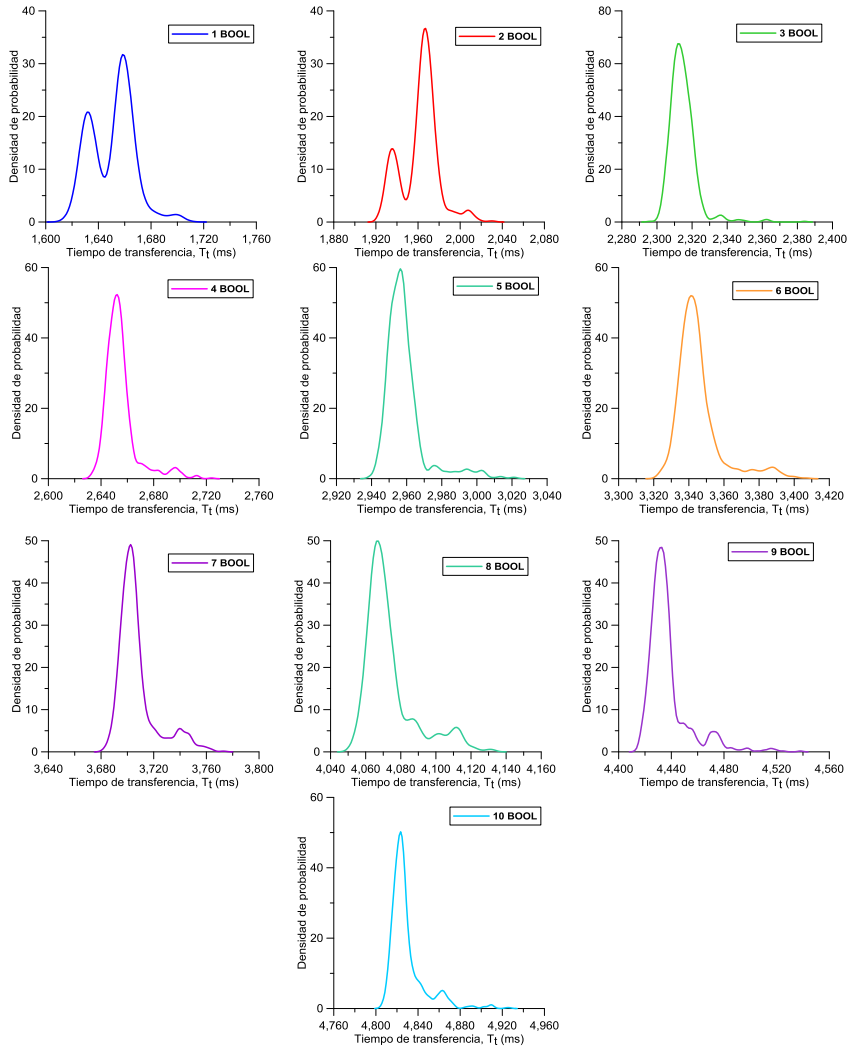


Figura 4.12. Funciones de densidad de  $T_t$  variando el número de datos.

Analizando los resultados mostrados tanto en la Figura 4.1 como desde la Figura 4.11 a la Figura 4.13, se observan dos tipos de patrones similares, con pequeñas variaciones entre ellos. Por un lado, para uno y dos datos, se obtuvieron comportamientos bimodales, pero a partir de tres o más datos las funciones de densidad ya no mostraron dicho comportamiento bimodal, pero la mayoría de valores se concentraron en torno a un valor central.

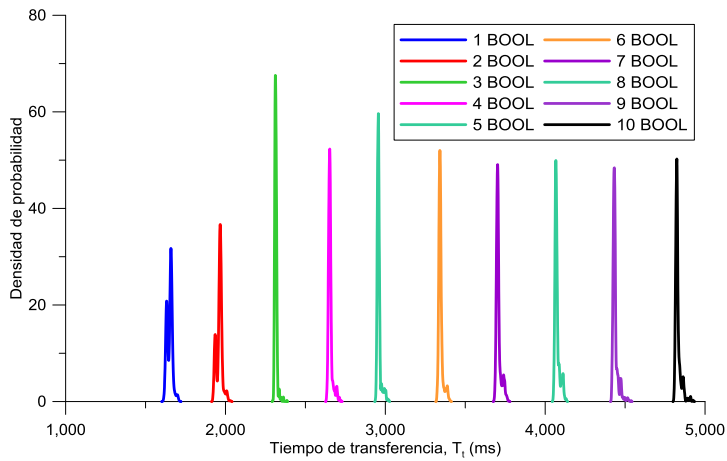


Figura 4.13. Comparativa de las funciones de densidad de  $T_t$  según el número de datos.

La Figura 4.14 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los diez ensayos. En esta gráfica se aprecia claramente una tendencia ascendente en el tiempo de transferencia cuando se incrementa el número de datos a transmitir.

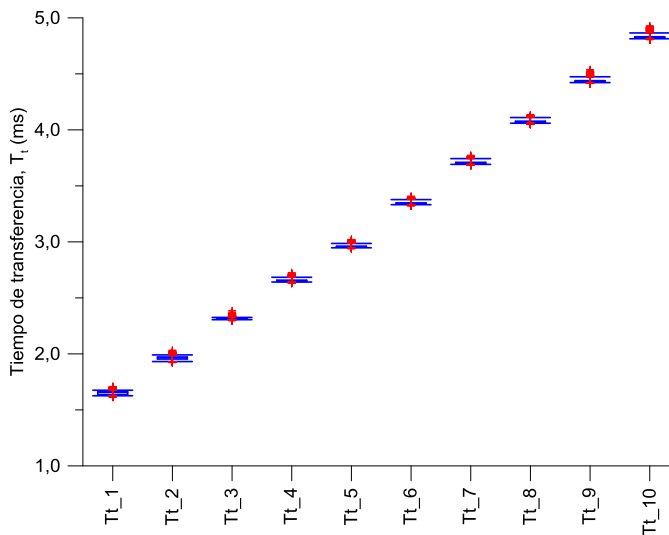


Figura 4.14. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  variando el número de datos.

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.8 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos.

Tabla 4.8. Valores estadísticos de la influencia del número de datos sobre  $T_t$ 

Número de datos	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Min)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
1	1,651	1,655	1,660	0,095	0,027	0,014000	0,016757	0,000281
2	1,962	1,965	1,966	0,110	0,018	0,013363	0,017870	0,000319
3	2,315	2,314	2,313	0,088	0,008	0,005158	0,007703	0,000059
4	2,655	2,652	2,650	0,092	0,011	0,008308	0,012635	0,000160
5	2,959	2,957	2,954	0,083	0,009	0,007451	0,011584	0,000134
6	3,345	3,343	3,341	0,085	0,010	0,008680	0,012951	0,000168
7	3,707	3,703	3,699	0,091	0,012	0,010499	0,014912	0,000222
8	4,074	4,069	4,066	0,082	0,012	0,010719	0,014752	0,000218
9	4,437	4,433	4,430	0,124	0,011	0,010831	0,016403	0,000269
10	4,829	4,825	4,825	0,121	0,011	0,011304	0,016801	0,000282

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza ( $\text{ms}^2$ )

La Figura 4.15 muestra la evolución de los valores medios obtenidos para el tiempo de transferencia  $T_t$  en los diez ensayos. Comparando esta gráfica con la Figura 4.14 se pueden obtener las mismas conclusiones, por lo que la gráfica de valores medios puede ser una buena elección para extraer conclusiones preliminares. Se observó un comportamiento lineal en el tiempo de transferencia  $T_t$ .

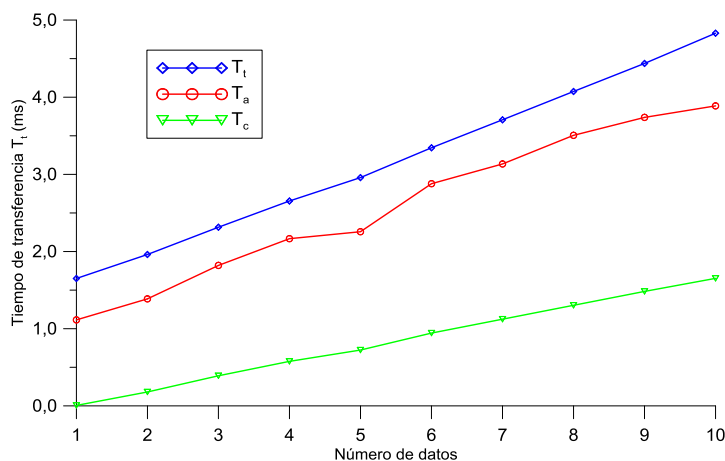


Figura 4.15. Influencia del número de datos sobre el tiempo de transferencia.

#### 4.1.3. Estudio de la influencia de los *data sets* y su actualización

En el apartado 2.4 se explicó que uno de los factores clave que podían afectar al tiempo de transferencia era el uso de los *data sets* para agrupar datos para su transmisión. Por ello, en este apartado se estudió la influencia del número *data sets* empleados, así como la distribución de los datos en los *data sets*, combinado con el número de llamadas a la función de actualización.

Se realizaron diferentes grupos de ensayos para uno, dos, cinco y diez objetos de datos. El tipo de dato seleccionado para todos los ensayos fue BOOL. Para cada grupo de ensayos con el mismo número de objetos, se varió el número de *data sets* y/o de llamadas a la función de actualización.

Conviene mencionar que un determinado número de objetos de datos se pueden agrupar de múltiples maneras mediante diferentes *data sets*, tal como se describió en el apartado 2.4. Sin embargo, para homogeneizar los ensayos y que las tramas generadas para un mismo grupo de ensayos fueran iguales en longitud, sólo se estudiaron aquellos casos en los que se cumplía este condicionante. Así, por ejemplo, en el caso de tener cinco objetos de datos, no se estudió la posible agrupación en dos *data sets*, por ejemplo, ya que ambos *data sets* no podrían contener el mismo número de objetos de datos.

Respecto a las llamadas a la función de actualización se siguió el mismo criterio y sólo se ensayaron aquellos casos en los cuales dicha función se encargaba de la actualización del mismo número de *data sets* en cada grupo de ensayos.

Por ejemplo, siguiendo este criterio, diez objetos de datos fueron agrupados en uno, dos, cinco y diez *data sets*, transmitiéndolos en todos los casos mediante una única llamada a la función de actualización. Posteriormente, para el caso de emplear dos llamadas a la función de actualización, los datos fueron agrupados en dos y diez *data sets*. Finalmente, para el caso de cinco llamadas a la función de actualización, los datos fueron agrupados en cinco y diez *data sets*. De este modo, todos los *data sets* de cada estudio hacían referencia al mismo número de datos.

Se confirmó experimentalmente que el número de llamadas a la función de actualización no podía ser mayor que el número de *data sets* ya que, en caso de serlo, implicaba la transmisión duplicada de datos, tal como se explicó en el apartado 2.4. Esto se comprobó mediante el uso del analizador de red Wireshark.

La Tabla 4.9 muestra los ensayos y los valores medios de los resultados obtenidos.

Con objeto de extraer conclusiones se analizaron con mayor detalle tres grupos de ensayos:

- *Influencia del número de data sets*. Se mantuvo constante el número de objetos de datos y de llamadas a la función de actualización, y se varió el número de *data sets*.
- *Influencia del número de llamadas a la función de actualización coincidente con el número de data sets*. Se mantuvo constante el número de objetos de datos, y se varió en igual cantidad el número de *data sets* y de llamadas a la función de actualización.
- *Influencia del número de llamadas a la función de actualización con número de data sets constante*. Se mantuvo constante el número de objetos de datos y de *data sets*, y se varió el número de llamadas a la función de actualización.

Tabla 4.9. Influencia de los *data sets* (DS) y llamadas a la función de actualización (C).

Tamaño Trama	DO	DS	C	T <sub>t</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>c</sub>	T <sub>l</sub>
Transmisión de 1 dato BOOL, 1 <i>data set</i> y 1 actualización							
138	1	1	1	1,650	1,115	0,005	1,644
Transmisión de 2 datos BOOL, agrupados en 1 ó 2 <i>data sets</i> y 1 ó 2 actualizaciones							
143	2	1	1	1,963	1,387	0,179	1,783
142	2	2	1	2,657	2,219	0,853	1,770
142	2	2	2	2,849	2,306	1,087	1,681
Transmisión de 5 datos BOOL, agrupados en 1 ó 5 <i>data sets</i> y 1 ó 5 actualizaciones							
152	5	1	1	2,959	2,257	0,713	2,236
142	5	5	1	6,037	5,740	3,523	2,329
142	5	5	5	6,671	6,114	4,828	1,748
Transmisión de 10 datos BOOL, agrupados en 1, 2, 5 ó 10 <i>data sets</i> y 1 actualización							
168	10	1	1	4,831	3,888	1,639	3,178
154	10	2	1	5,565	4,918	2,352	3,200
145	10	5	1	8,035	7,688	4,532	3,473
142	10	10	1	12,638	12,236	8,325	3,944
Transmisión de 10 datos BOOL, agrupados en 2 ó 10 <i>data sets</i> y 2 actualizaciones							
154	10	2	2	5,758	5,067	2,582	2,481
141	10	10	2	12,944	12,429	9,930	2,795
Transmisión de 10 datos BOOL, agrupados en 5 ó 10 <i>data sets</i> y 5 actualizaciones							
145	10	5	5	8,769	8,140	6,663	2,016
142	10	10	5	13,367	12,766	11,170	2,083
Transmisión de 10 datos BOOL, agrupados en 10 <i>data sets</i> y 10 actualizaciones							
142	10	10	10	13,912	13,252	11,962	1,849
*Valores medios de los tiempos expresados en ms.							
** Tamaño de trama expresado en bytes.							
*** Objetos de datos tipo BOOL							
**** DO: Data Object, DS: Data set, C: Actualización							

#### 4.1.3.1. Influencia del número de *data sets*

Tal como se indicó anteriormente, para este grupo de ensayos, se mantuvo constante el número de objetos de datos y de llamadas a la función de actualización, y se varió el número de *data sets*. La Tabla 4.10 muestra un resumen de las características de los ensayos.

La Tabla 4.11 muestra los grupos de datos que se ensayaron y como se distribuyeron en diferente número de *data sets*.

Tabla 4.10. Resumen del estudio con *data sets*.

<b>Estudio</b>	Influencia del número de <i>data sets</i>
<b>Objetivo</b>	Determinar influencia del número de <i>data sets</i> en el tiempo de transferencia
<b>Tipo de datos</b>	BOOL
<b>Tipo de nodo lógico</b>	GGIO
<b>Número de datos</b>	10
<b>Número de data sets</b>	1, 2, 5 y 10
<b>Número de llamadas</b>	1
<b>Número de ensayos</b>	4
<b>Número de medidas</b>	1000

Tabla 4.11. Distribución de los datos en diferentes *data sets*.

Ensayo	Número de <i>data sets</i>	Datos y <i>data set</i> asociado									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DS01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DS02	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
DS05	5	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
DS10	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

\* El número indica a qué data set está asociado cada dato.

La Tabla 4.12 muestra los valores medios de las principales magnitudes medidas para este grupo de ensayos. Para la primera parte de este estudio interesaba conocer fundamentalmente los valores del tiempo de transferencia total,  $T_t$ .

Tabla 4.12. Influencia del número de *data sets* sobre el tiempo de transferencia.

Ensayo	Tamaño trama	$T_t$ medio	$T_a$ medio	$T_c$ medio	$T_1$ medio
DS01	168	4,831	3,888	1,639	3,178
DS02	154	5,565	4,918	2,352	3,200
DS05	145	8,035	7,688	4,532	3,473
DS10	142	12,638	12,236	8,325	3,944

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL

Para un número constante de objetos de datos, el tiempo de transferencia total se incrementó cuando el número de *data sets* lo hizo. Del mismo modo, cuando el número de *data sets* se incrementó, el tiempo necesario para que el primer dato fuera recibido por el cliente ( $T_1$ ) también aumentó. La Figura 4.16 muestra esta influencia mediante los valores medios de los tiempos medidos para el caso de transmitir diez objetos de datos agrupados en uno, dos, cinco y diez *data sets*. La Figura 4.17 presenta las funciones de densidad correspondientes a los cuatro casos que se ensayaron. La Figura 4.18 refleja mediante diagramas de cajas la variación del tiempo de transferencia  $T_t$ .

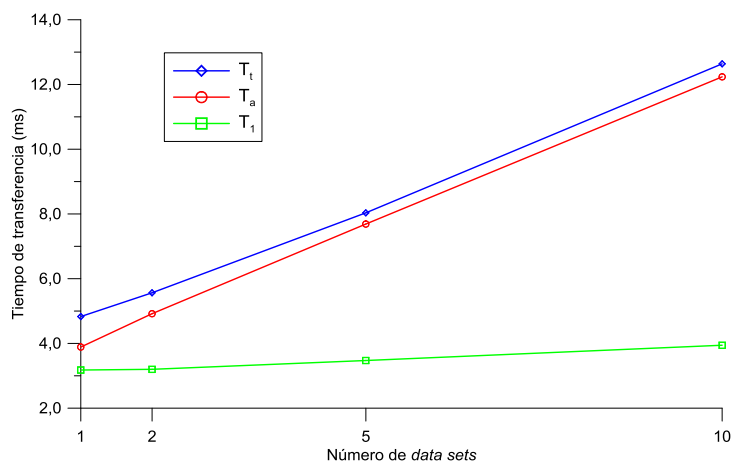


Figura 4.16. Influencia del número de data sets en el tiempo de transferencia. Transmisión de 10 objetos de datos tipo BOOL, agrupados en 1, 2, 5 y 10 data sets con una llamada a la función de actualización.

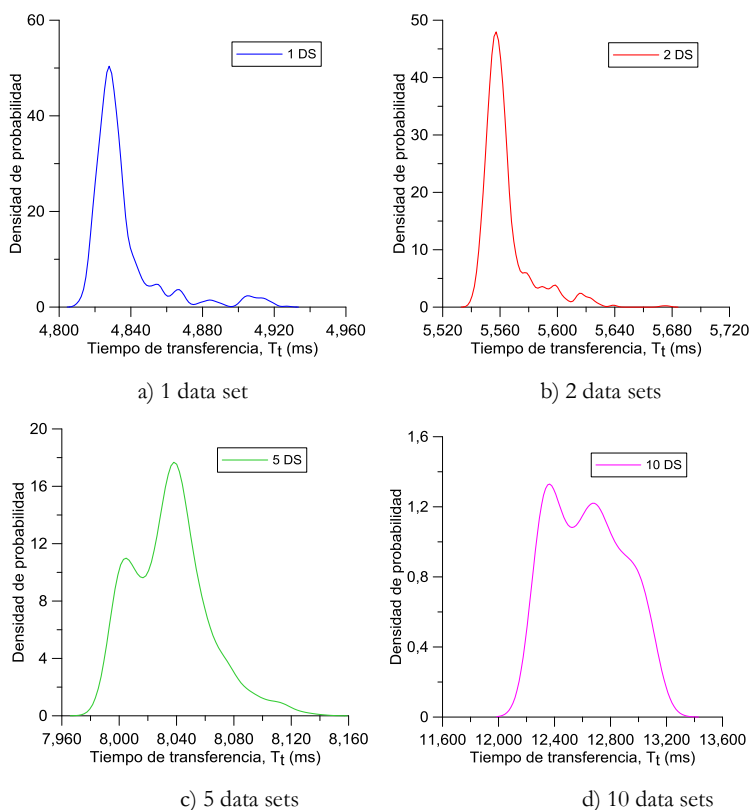


Figura 4.17. Influencia del número de *data sets* sobre el tiempo  $T_t$ .



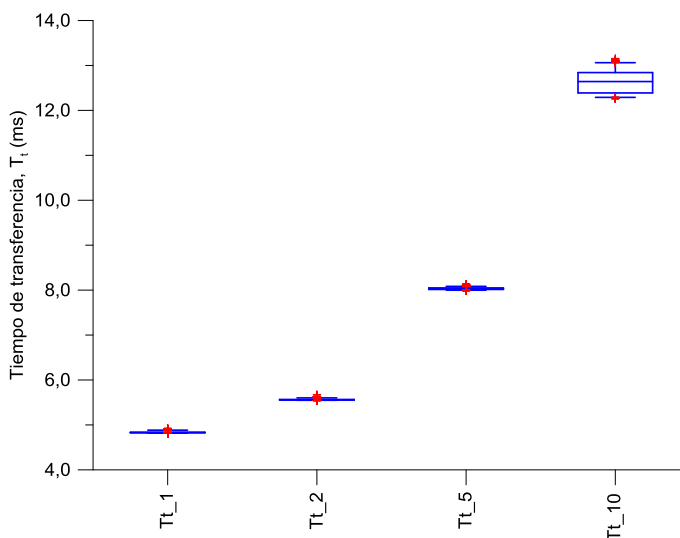


Figura 4.18. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  según número de *data sets*.

El análisis de las funciones de densidad de este grupo de ensayos permitió observar que el tiempo de transferencia total  $T_t$  no seguía ningún patrón uniforme, al igual que se había observado en el estudio de la influencia del número de datos. Con objeto de investigar este hecho se obtuvieron las funciones de densidad del tiempo que transcurre hasta que es extraído el primer objeto de datos,  $T_1$ . Dichas funciones se muestran en la Figura 4.19.

En este caso, sí se observa un patrón similar en los cuatro casos, con un claro comportamiento bimodal. Esto llevó a deducir que el tiempo que dedica el equipo cliente a procesar la recepción de los mensajes asociados a los diferentes *data sets* no presenta un patrón uniforme, influenciando en gran medida al tiempo total de transferencia.

La Figura 4.20 muestra la variación del tiempo  $T_1$  al variar el número de *data sets*. En dicha figura se observa que sigue el patrón ascendente del tiempo total de transferencia  $T_t$ .

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.13 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos.

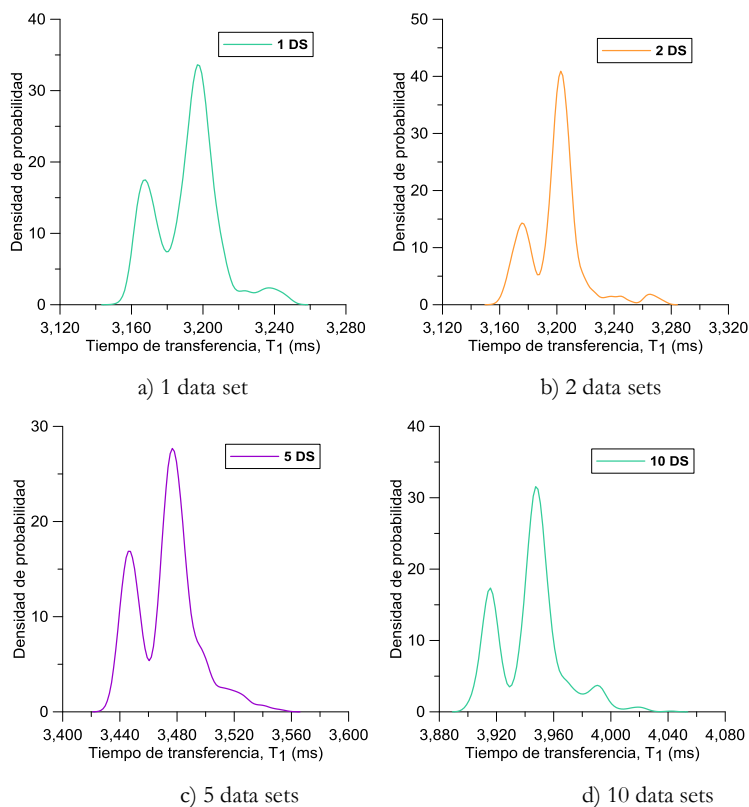


Figura 4.19. Influencia del número de *data sets* sobre el tiempo  $T_1$ .

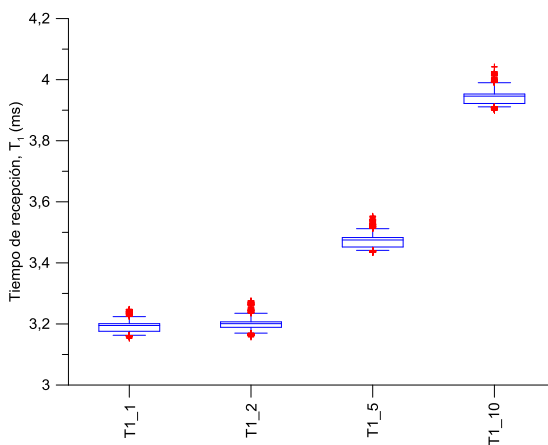


Figura 4.20. Variación del tiempo  $T_1$  según el número de *data sets*.

Tabla 4.13. Valores estadísticos de la influencia del número de *data sets* sobre  $T_t$ 

Número de <i>data sets</i>	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Mín)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
1	4,835	4,830	4,829	0,116	0,012	0,012821	0,019803	0,000392
2	5,564	5,559	5,559	0,137	0,012	0,011444	0,016998	0,000289
5	8,035	8,036	8,035	0,153	0,034	0,020564	0,026622	0,000709
10	12,636	12,642	12,293	0,899	0,452	0,218001	0,253330	0,064176

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms<sup>2</sup>)

#### 4.1.3.2. Influencia del número de llamadas a la función de actualización coincidente con *data sets*

El ensayo anterior reveló que, para un número constante de objetos de datos, el tiempo de transferencia total  $T_t$  y el tiempo empleado para que el primer dato fuera recibido por el cliente  $T_1$  aumentaron en consonancia con el número de *data sets* empleados, cuando se llevó a cabo una única llamada a la función de actualización. Sin embargo, cuando el número de llamadas a la función de actualización se incrementó en coincidencia con el número de *data sets*, el tiempo  $T_1$  empleado para que el primer dato fuera recibido por el cliente disminuyó.

La Tabla 4.14 muestra un resumen de las características de los ensayos.

Tabla 4.14. Resumen del estudio variando llamadas a la función de actualización y *data sets*.

Estudio	Influencia del número de llamadas a la función de actualización en número igual al de <i>data sets</i>
Objetivo	Determinar influencia sobre el tiempo de transferencia del número de llamadas a la función e actualización efectuando una llamada para cada <i>data set</i> .
Tipo de datos	BOOL
Tipo de nodo lógico	GGIO
Número de datos	10
Número de <i>data sets</i>	1, 2, 5 y 10
Número de llamadas	1, 2, 5 y 10
Número de ensayos	4
Número de medidas	1000

La Tabla 4.15 muestra los grupos de datos que se ensayaron y como se distribuyeron en diferente número de *data sets*.

La Tabla 4.16 muestra los valores medios de las principales magnitudes medidas para este grupo de ensayos. Para la primera parte de este estudio interesaba conocer fundamentalmente los valores del tiempo de transferencia total,  $T_t$ .

**Tabla 4.15. Distribución de los datos en diferentes *data sets*.**

Ensayo	Número de <i>data sets</i>	Número de llamadas	Datos y <i>data set</i> asociado									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C02	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
C05	5	5	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
C10	10	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabla 4.16. Influencia del número de llamadas a la función de actualización coincidente con los *data sets* sobre el tiempo de transferencia.**

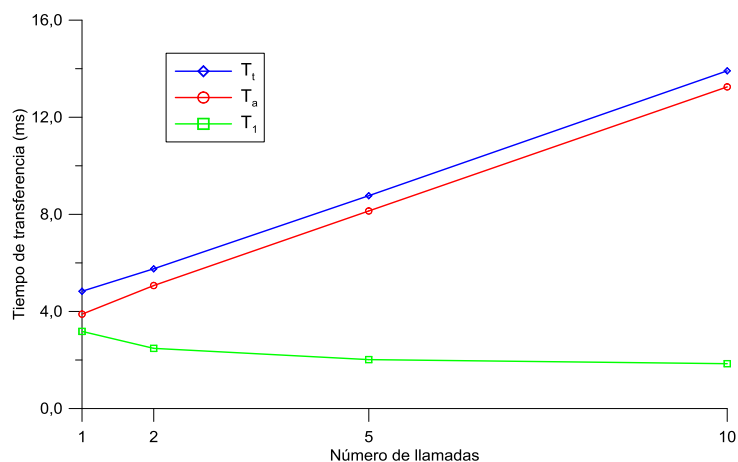
Ensayo	Tamaño trama	$T_t$ medio	$T_a$ medio	$T_c$ medio	$T_1$ medio
C01	168	4,831	3,888	1,639	3,178
C02	154	5,758	5,067	2,582	2,481
C05	145	8,769	8,140	6,663	2,016
C10	142	13,912	13,252	11,962	1,849

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

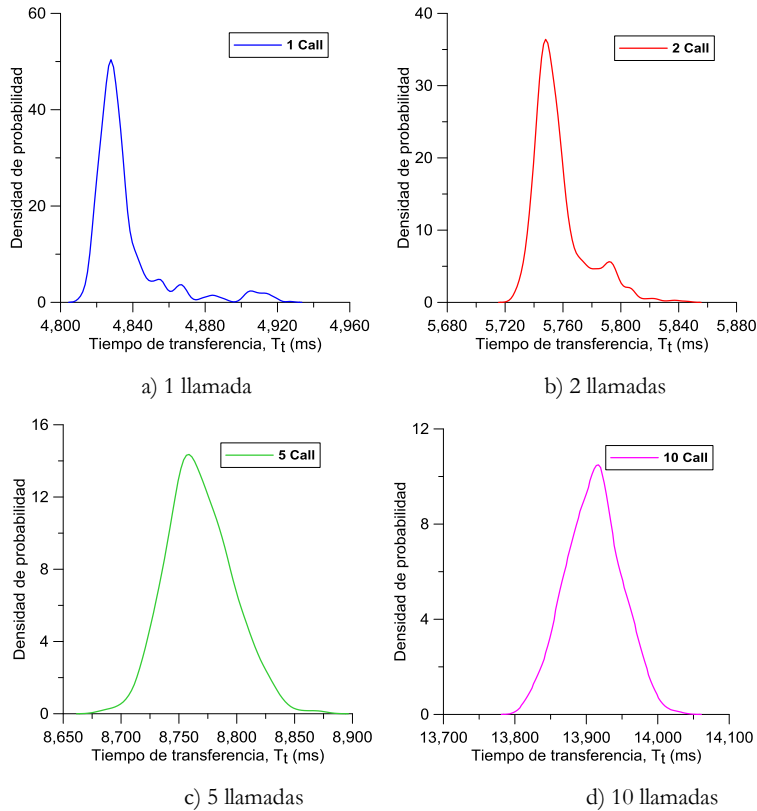
\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL

La Figura 4.21 muestra esta influencia mediante los valores medios de las magnitudes.



**Figura 4.21. Influencia de las llamadas a la función de actualización en número coincidente con los *data sets*.**

La Figura 4.22 representa las funciones de densidad de los cuatro casos que se ensayaron. La Figura 4.23 refleja mediante diagramas de cajas la variación del tiempo de transferencia  $T_t$ .



**Figura 4.22. Influencia del número de llamadas a la función de actualización sobre el tiempo  $T_t$ .**

Al igual que en el caso anterior, el análisis de las funciones de densidad de este grupo de ensayos permitió observar que el tiempo de transferencia total  $T_t$  no seguía ningún patrón uniforme. Nuevamente, con objeto de investigar este hecho se obtuvieron las funciones de densidad del tiempo  $T_1$ , tal como se muestra en la Figura 4.24. En este caso, sí se observó un patrón similar en los cuatro casos, con un claro comportamiento bimodal. Esto llevó a confirmar que el tiempo que dedica el equipo cliente a procesar la recepción de los mensajes asociados a los diferentes *data sets* no presenta un patrón uniforme, influenciando en gran medida al tiempo total de transferencia.

La Figura 4.25 muestra la variación del tiempo  $T_1$  al variar el número de llamadas a la función de actualización coincidiendo con el número de *data sets*. En dicha figura se observa que sigue un patrón descendente, a diferencia de los ensayos anteriores.

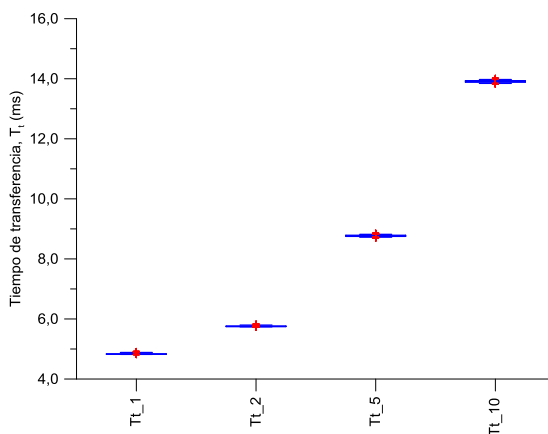


Figura 4.23. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  según número de *data sets* y llamadas a la función de actualización.

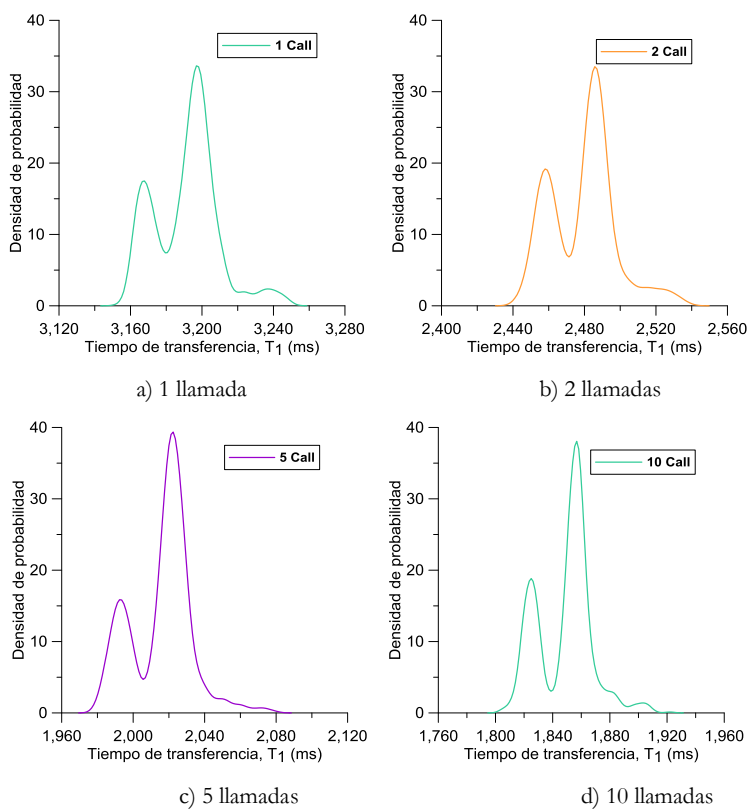


Figura 4.24. Influencia del número de llamadas a la función de actualización sobre el tiempo  $T_1$ .

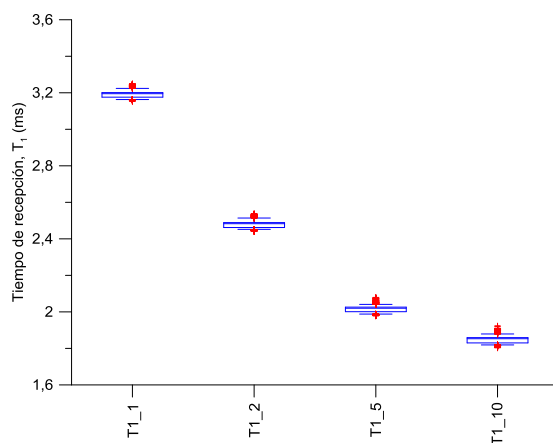


Figura 4.25. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_1$  según número de *data sets* y llamadas a la función de actualización.

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.17 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_1$  medidos en los ensayos.

Tabla 4.17. Valores estadísticos de la influencia sobre  $T_1$  del número de llamadas a la función de actualización

Número de llamadas	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Mín)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
1	4,835	4,830	4,829	0,116	0,012	0,012821	0,019803	0,000392
2	5,757	5,752	5,747	0,121	0,017	0,013526	0,018332	0,000336
5	8,768	8,766	8,773	0,190	0,038	0,022643	0,028447	0,000809
10	13,910	13,911	13,892	0,218	0,051	0,030735	0,038419	0,001476

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms<sup>2</sup>)

#### 4.1.3.3. Influencia del número de llamadas a la función de actualización con número de *data sets* constante

Por último, se estudió el caso de diez objetos de datos referenciados cada uno por su propio *data sets* y realizando diferente número de llamadas a la función de actualización. Comparando el tiempo necesario para que el cliente recibiera el primer dato ( $T_1$ ) en los

casos de realizar una, dos, cinco y diez llamadas a la función de actualización, dicho tiempo varió desde 2,944 ms a 1,894 ms. Dicho tiempo  $T_1$  se redujo prácticamente a la mitad.

La Tabla 4.18 muestra un resumen de las características de los ensayos.

**Tabla 4.18. Resumen del estudio variando las llamadas a la función de actualización.**

<b>Estudio</b>	Influencia del número de llamadas a la función de actualización para un número de <i>data sets</i> constante
<b>Objetivo</b>	Determinar la influencia sobre el tiempo de transferencia del número de llamadas a la función de actualización para un número de <i>data sets</i> constante
<b>Tipo de datos</b>	BOOL
<b>Tipo de nodo lógico</b>	GGIO
<b>Número de datos</b>	10
<b>Número de data sets</b>	10
<b>Número de llamadas</b>	1, 2, 5 y 10
<b>Número de ensayos</b>	4
<b>Número de medidas</b>	1000

La Tabla 4.19 muestra cómo se realizaron las diferentes llamadas a la función de actualización manteniendo constante el número de *data sets*.

La Tabla 4.20 muestra los valores medios de las principales magnitudes medidas para este grupo de ensayos. Para la primera parte de este estudio interesaba conocer fundamentalmente los valores del tiempo de transferencia total,  $T_t$ .

**Tabla 4.19. Distribución de las llamadas a la función de actualización.**

Ensayo	Número de data sets	Número de llamadas	Datos y <i>data sets</i> asociados a las llamadas									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C01	10	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C02	10	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C05	10	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C10	10	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabla 4.20. Influencia sobre el tiempo de transferencia del número de llamadas a la función de actualización con número de *data sets* constante.**

Ensayo	Tamaño trama	$T_t$ medio	$T_a$ medio	$T_c$ medio	$T_1$ medio
C01	142	12,638	12,236	8,325	3,944
C02	142	12,944	12,429	9,93	2,795
C05	142	13,367	12,766	11,17	2,083
C10	142	13,912	13,252	11,962	1,849

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL

La Figura 4.26 representa las funciones de densidad de los cuatro casos que se ensayaron.



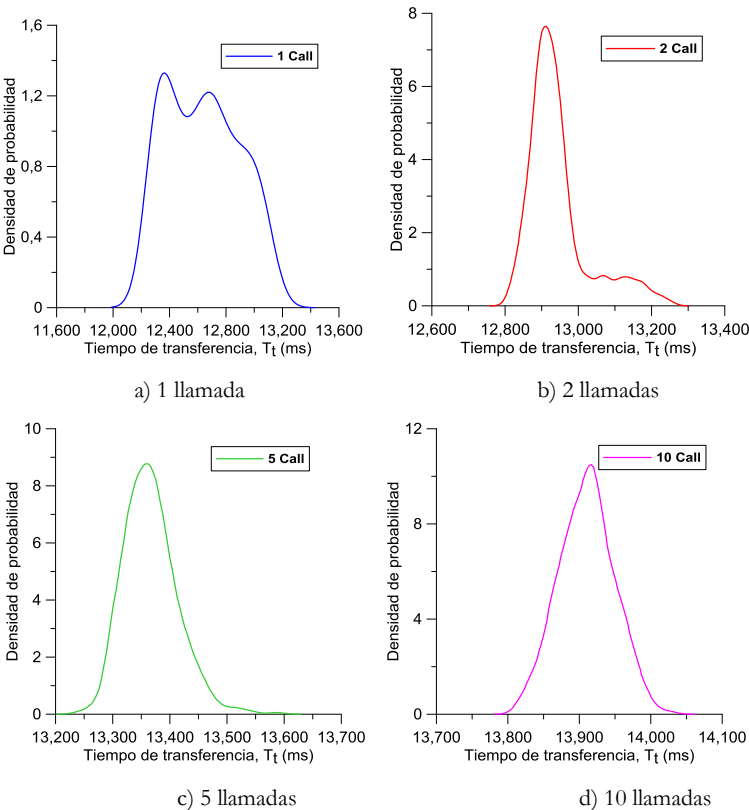


Figura 4.26. Influencia sobre el tiempo  $T_t$  del número de llamadas a la función de actualización.

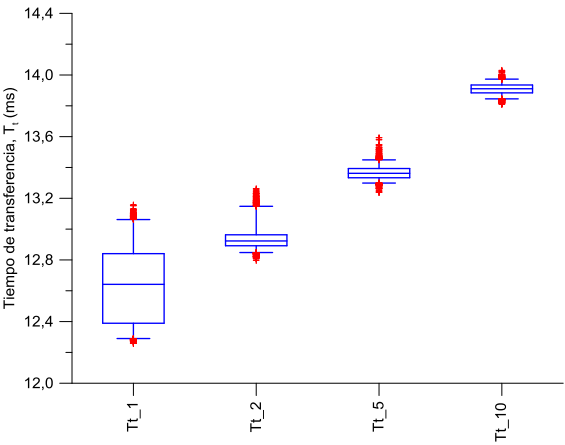
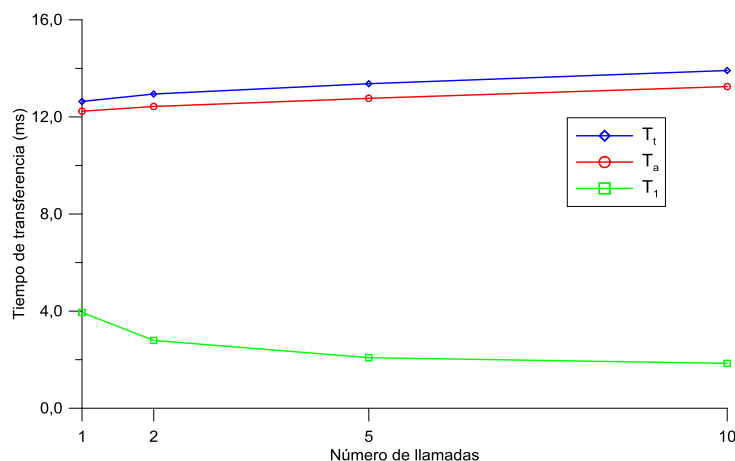


Figura 4.27. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  según número de llamadas a la función de actualización.

La Figura 4.27 refleja mediante diagramas de cajas la variación del tiempo de transferencia  $T_t$ . La Figura 4.28 muestra los valores medios de los resultados.

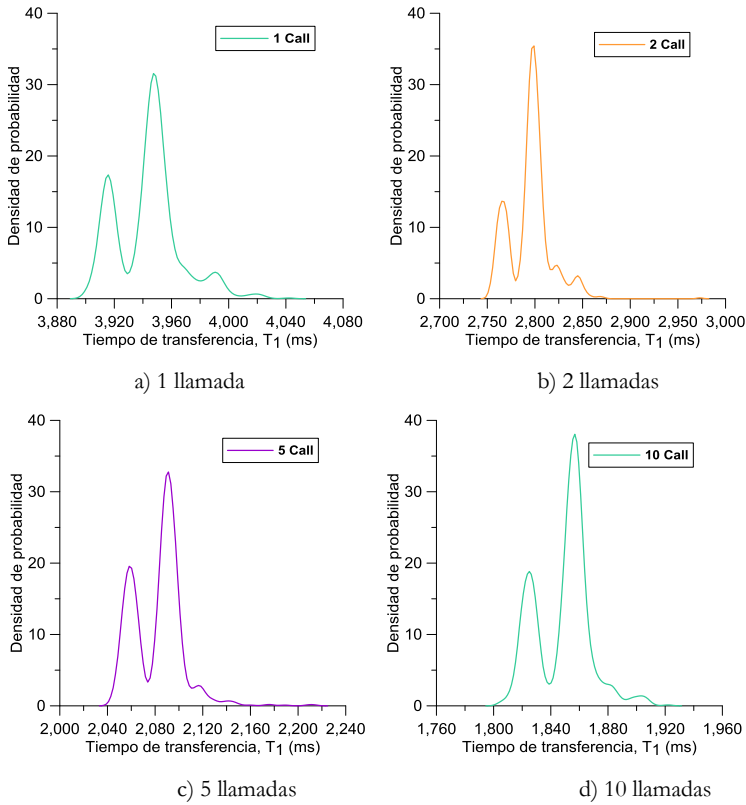


**Figura 4.28.** Influencia de las llamadas a la función de actualización para diez objetos de datos y diez *data sets*.

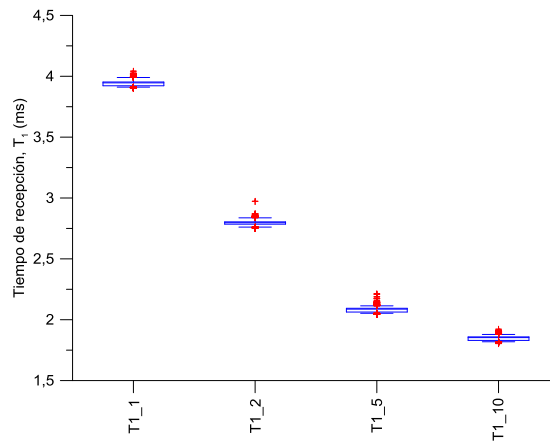
Al igual que en el caso anterior, el análisis de las funciones de densidad de este grupo de ensayos permitió observar que el tiempo de transferencia total  $T_t$  no seguía ningún patrón uniforme. Nuevamente, con objeto de investigar este hecho se obtuvieron las funciones de densidad del tiempo  $T_1$ , tal como se muestra en la Figura 4.29. En este caso, sí se observó un patrón similar en los cuatro casos, con un claro comportamiento bimodal. Esto llevó a confirmar que el tiempo que dedica el equipo cliente a procesar la recepción de los mensajes asociados a los diferentes *data sets* no presenta un patrón uniforme, influenciando en gran medida al tiempo total de transferencia.

La Figura 4.30 muestra la variación del tiempo  $T_1$  al variar el número de llamadas a la función de actualización para un número de *data sets* constante. En dicha figura se observa que sigue un patrón descendente, al igual que sucedió en el grupo de ensayos anterior.

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.21 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos.



**Figura 4.29.** Influencia sobre el tiempo  $T_1$  del número de llamadas a la función de actualización.



**Figura 4.30.** Comparativa de tiempos de transferencia  $T_1$  según número el número de llamadas a la función de actualización.

**Tabla 4.21. Valores estadísticos de la influencia sobre  $T_t$  del número de llamadas a la función de actualización con número de data sets constante.**

Número de llamadas	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Mín)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
1	12,636	12,642	12,293	0,899	0,452	0,218001	0,253330	0,064176
2	12,944	12,923	12,905	0,463	0,071	0,061129	0,085413	0,007295
5	13,366	13,362	13,351	0,355	0,060	0,036574	0,047203	0,002228
10	13,910	13,911	13,892	0,218	0,051	0,030735	0,038419	0,001476

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms<sup>2</sup>)

#### 4.1.4. Estudio de la influencia del tipo de nodo lógico

Todos los nodos lógicos que modelan el sistema eléctrico contienen diferente número y tipo de objetos de datos. Los datos pueden ser del mismo o diferente tipo básico [35]. Se realizaron diferentes ensayos para determinar la influencia del tipo de nodo lógico sobre el tiempo de transferencia. Los ensayos se hicieron para uno y diez objetos de datos de tipo BOOL, INT32 y VISSTR32, contenidos en nodos lógicos de tipo GGIO y MMXU. La Tabla 4.22 muestra los resultados obtenidos de los ensayos.

**Tabla 4.22. Influencia del tipo de nodo lógico.**

LN: GGIO								
Tipo Dato	Tamaño Trama	DO	DS	C	$T_t$	$T_a$	$T_c$	$T_1$
BOOL	138	1	1	1	1,650	1,115	0,005	1,644
INT32	140	1	1	1	1,689	1,142	0,004	1,683
VISSTR32	170	1	1	1	1,685	1,141	0,005	1,680
BOOL	168	10	1	1	4,831	3,888	1,639	3,178
INT32	184	10	1	1	5,205	4,134	1,771	3,421
VISSTR32	477	10	1	1	5,135	4,097	1,707	3,411
LN: MMXU								
Tipo Dato	Tamaño Trama	DO	DS	C	$T_t$	$T_a$	$T_c$	$T_1$
BOOL	147	1	1	1	1,912	1,198	0,005	1,906
INT32	149	1	1	1	1,951	1,223	0,005	1,946
VISSTR32	179	1	1	1	1,943	1,219	0,005	1,938
BOOL	211	10	1	1	7,957	5,247	3,218	4,727
INT32	231	10	1	1	8,338	5,502	3,351	4,974
VISSTR32	524	10	1	1	8,252	5,455	3,287	4,953

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.  
 \*\* Tamaño de trama expresado en bytes.  
 \*\*\* DO: Data Object, DS: Data set, C: Actualización

Se observó que para el mismo tipo de dato, el tipo de nodo lógico influyó en el tiempo de transferencia. En caso del nodo lógico MMXU, el tiempo de transferencia obtenido fue mayor que para el caso del dato contenido en un nodo lógico de tipo GGIO. Aunque las longitudes de las tramas correspondientes para los dos casos varían, no parece que sea esta la causa principal para la diferencia de tiempo que se obtuvo. Esto se puede verificar comparando el tiempo de transferencia para un dato de tipo VISSTR32 contenido en un nodo lógico GGIO, con una longitud de trama de 170 bytes, con el dato tipo BOOL en un nodo lógico MMXU, con una longitud de trama de 147 bytes. Este último implicó tiempos de transferencia mayores. Por tanto, la longitud de la trama no es el principal factor que afecta al tiempo de transferencia.

#### 4.1.5. Estudio de la influencia del número de nodos lógicos

Por último, se estudió la influencia sobre el tiempo de transferencia de la transmisión de varios objetos de datos contenidos en una o varias instancias del mismo tipo de nodo lógico.

La Tabla 4.7 muestra los resultados que se obtuvieron cuando todos los objetos de datos estaban contenidos en el mismo nodo lógico, tipo GGIO. La Tabla 4.23 muestra los valores obtenidos cuando cada objeto de datos estaba ubicado en una instancia diferente del mismo tipo de nodo lógico. Comparando ambas tablas, tal como se puede observar gráficamente en la Figura 4.31, se deduce que no hay diferencia apreciable en los resultados obtenidos.

**Tabla 4.23. Influencia del número de nodos lógicos.**

Número LN	Tamaño Trama	DO	DS	C	Tt	Ta	Tc	Tl
1	138	1	1	1	1,650	1,115	0,005	1,644
2	145	2	1	1	1,961	1,409	0,180	1,773
3	148	3	1	1	2,274	1,727	0,354	1,912
4	147	4	1	1	2,611	2,100	0,539	2,054
5	150	5	1	1	2,955	2,499	0,720	2,224
6	154	6	1	1	3,307	2,930	0,896	2,400
7	157	7	1	1	3,670	3,391	1,088	2,571
8	160	8	1	1	4,046	3,899	1,271	2,762
9	163	9	1	1	4,422	4,430	1,448	2,960
10	166	10	1	1	4,824	4,992	1,651	3,159

\*Valores medios expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL

\*\*\*\* LN: Nodo lógico, DO: Data Object, DS: Data set, C: Actualización

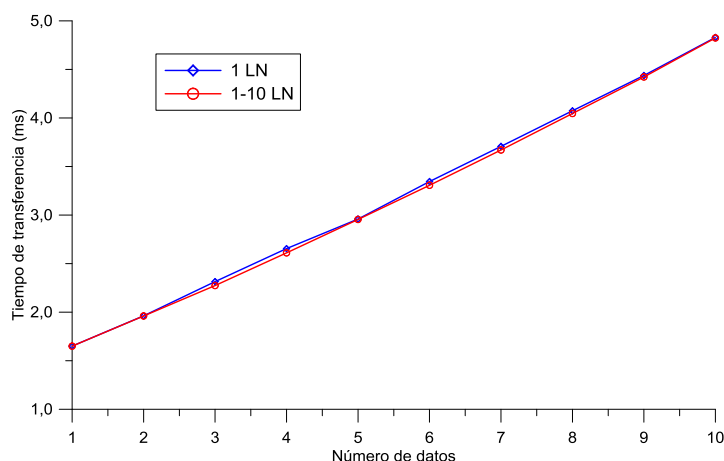


Figura 4.31. Influencia del número de nodos lógicos.

## 4.2. Integración de IEC 61850 en un sistema embebido

En este apartado se describen los resultados de la integración del sistema de comunicaciones IEC 61850 en el sistema embebido cRIO de *National Instruments*. Con objeto de contrastar los resultados mostrados por los ensayos realizados con la librería PIS-10, en este apartado se incluyen los resultados de los ensayos más relevantes realizados para estudiar la influencia de determinados factores relacionados con los datos sobre el tiempo de procesamiento en las comunicaciones IEC 61850.

Se presentan los resultados correspondientes a los siguientes ensayos:

- Estudio de la influencia del número de objetos de datos
- Estudio de la influencia de los *data sets* y su actualización
- Estudio de la influencia del tipo de nodo lógico
- Estudio de la influencia del número de nodos lógicos

Tal como se expuso en el apartado 3.2, la metodología seguida en estas pruebas, desde el punto de vista del procesamiento de los datos resultados de las mismas, se ha basado en el análisis por medio de estadísticos de tendencia central y de dispersión, y para la interpretación de los resultados se han empleado herramientas estadísticas gráficas como histogramas, funciones de densidad de probabilidad y diagramas de caja (*boxplots*).

### 4.2.1. Estudio de la influencia del número de objetos de datos

El objetivo de este estudio fue verificar la influencia del número de objetos de datos sobre el tiempo de transferencia. Este es un factor que se esperaba que influyera

claramente sobre el tiempo de transferencia, debido a que este número afectaba directamente a la longitud de las tramas. Se realizaron diez ensayos variando el número de objetos de datos tipo BOOL, desde uno hasta diez. Para cada ensayo, todos los objetos de datos fueron incluidos en un único nodo lógico tipo GGIO. La Tabla 4.24 muestra un resumen de las características de los ensayos.

**Tabla 4.24. Resumen del estudio con número de datos.**

<b>Estudio</b>	Influencia del número de objetos de datos
<b>Objetivo</b>	Determinar influencia del número de datos en el tiempo de transferencia
<b>Tipo de datos</b>	BOOL
<b>Tipo de nodo lógico</b>	GGIO
<b>Número de datos</b>	De 1 a 10
<b>Número de data sets</b>	1
<b>Número de ensayos</b>	10
<b>Número de medidas</b>	1000

La Tabla 4.25 muestra los grupos de datos que se ensayaron y las magnitudes medidas. Para este estudio interesaba conocer fundamentalmente los valores del tiempo de transferencia total,  $T_t$ . Comparando estos resultados con los obtenidos para el mismo ensayo realizado con la librería PIS-10 se observa que se obtuvieron menores tiempos de transferencia con el sistema cRIO y la librería de comunicaciones industriales de *National Instruments*.

La Figura 4.32 muestra gráficamente los resultados obtenidos para el tiempo de transferencia  $T_t$  cuando se transmitió un dato tipo BOOL.

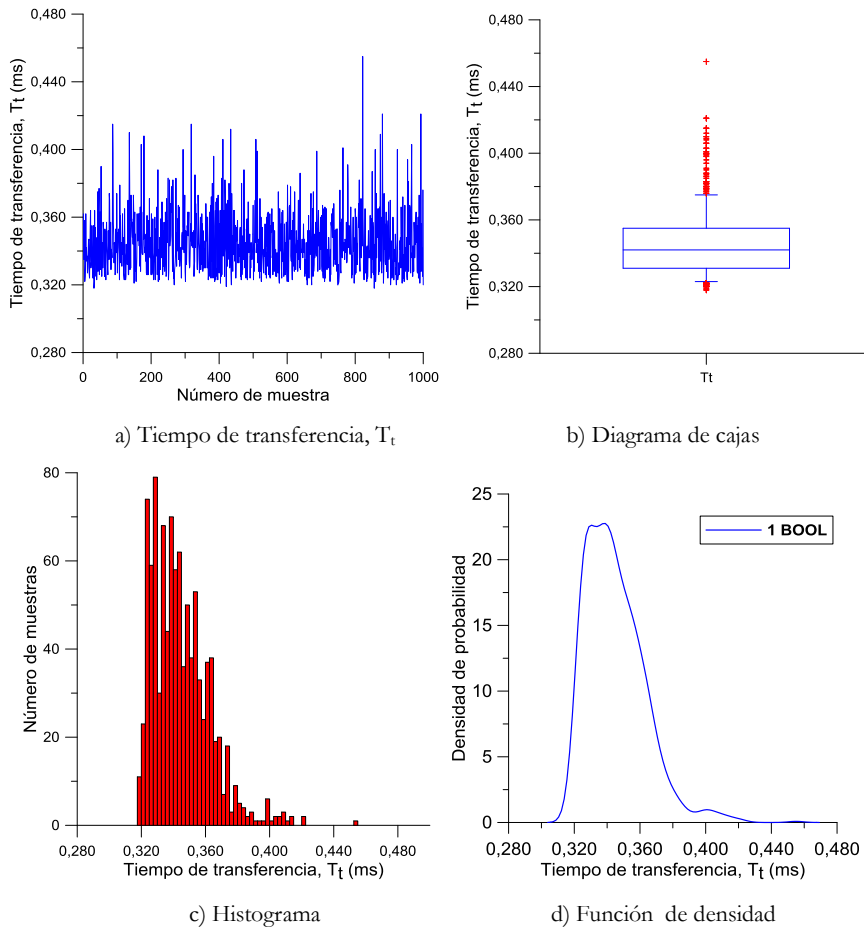
**Tabla 4.25. Influencia del número de objetos de datos.**

Número objetos	Tamaño trama	$T_t$ medio	$T_a$ medio	$T_c$ medio
1	137	0,345	0,127	0,237
2	158	0,434	0,145	0,324
3	178	0,516	0,160	0,406
4	198	0,593	0,175	0,480
5	218	0,670	0,193	0,557
6	238	0,754	0,206	0,639
7	259	0,829	0,225	0,715
8	279	0,907	0,237	0,792
9	300	0,984	0,252	0,868
10	320	1,060	0,267	0,944

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

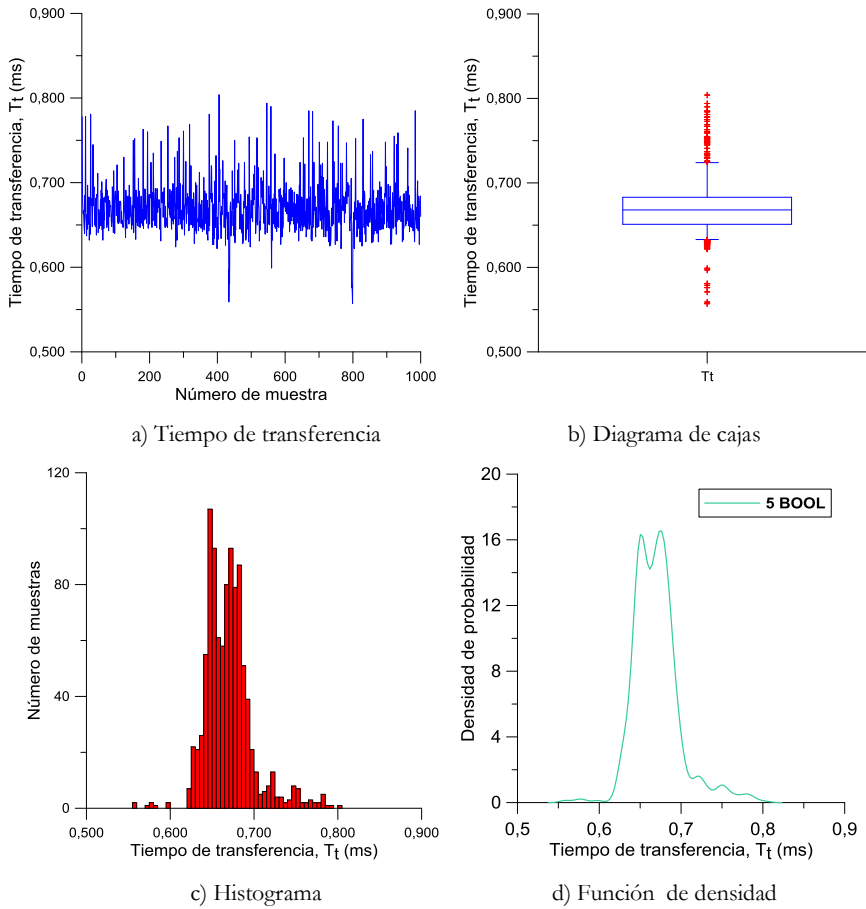
\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL



**Figura 4.32. Transferencia de un dato tipo BOOL.**

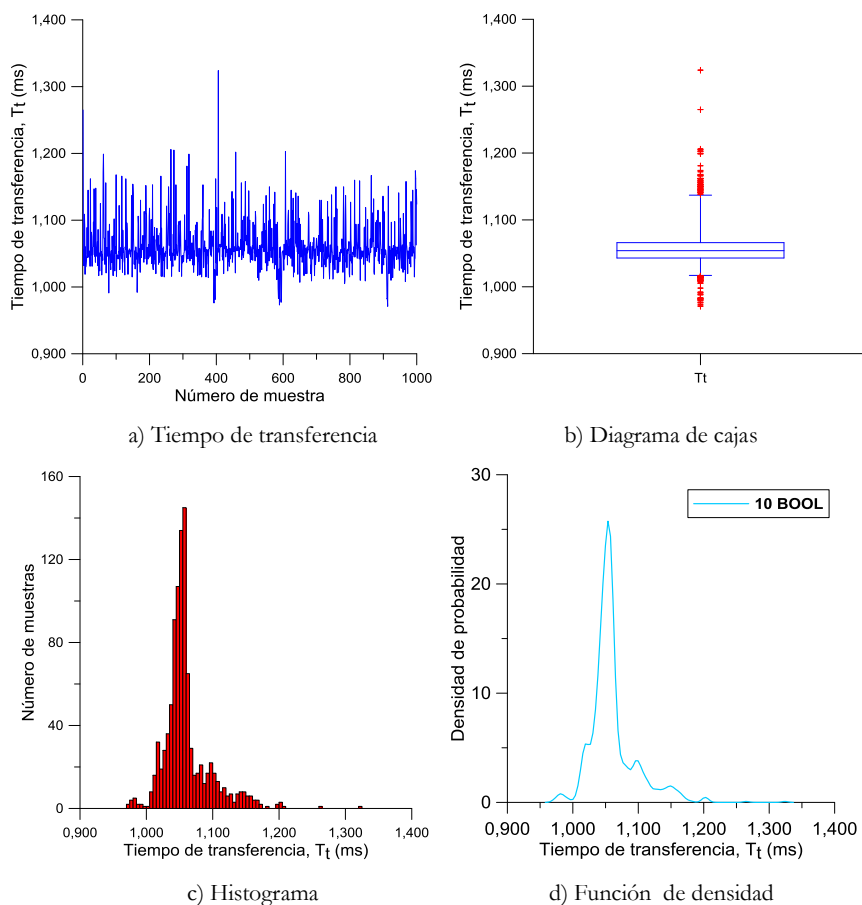
La Figura 4.33 muestra gráficamente los resultados obtenidos para el tiempo de transferencia  $T_t$  cuando se transmitieron cinco datos tipo BOOL.





**Figura 4.33. Transferencia de cinco datos tipo BOOL.**

La Figura 4.34 muestra gráficamente los resultados obtenidos para el tiempo de transferencia  $T_t$  cuando se transmitieron diez datos tipo BOOL.



**Figura 4.34. Transferencia de diez datos tipo BOOL.**

La Figura 4.35 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los diez ensayos. Analizando los resultados mostrados desde la Figura 4.32 a la Figura 4.35, se observan patrones similares, con pequeñas variaciones de unos a otros. El resultado más relevante que se puede extraer de esta comparativa es que para todos los ensayos la gran mayoría de los valores medidos se agrupan en torno a un mismo valor central y una pequeña proporción se desvían de dicho valor. Estos valores que se desvían del valor central lo hacen, en general, introduciendo retardos adicionales.

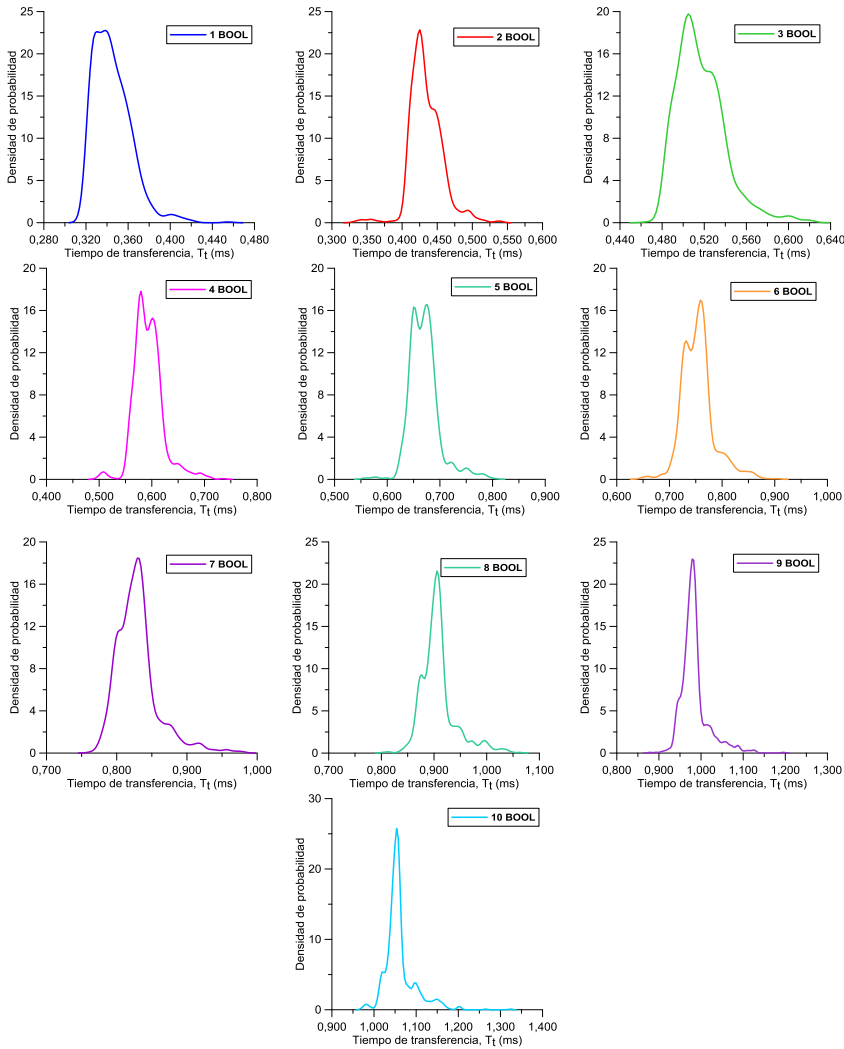


Figura 4.35. Funciones de densidad de  $T_t$  según el número de datos.

La Figura 4.36 muestra, combinadas sobre una misma gráfica, las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los diez ensayos. En ella se puede observar claramente que presentan distribuciones similares que se diferencian fundamentalmente porque cada ensayo presenta unos tiempos de transferencia mayores que el anterior.

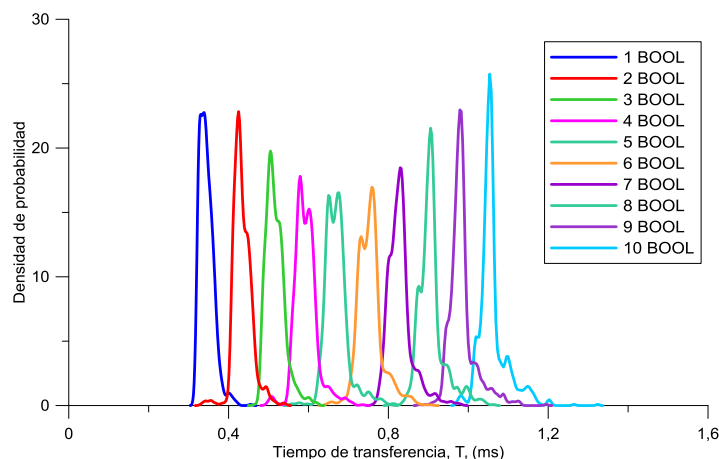


Figura 4.36. Comparativa de las funciones de densidad de  $T_t$  según el número de datos.

La Figura 4.37 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los diez ensayos. En esta gráfica se aprecia claramente la tendencia ascendente que presenta el tiempo de transferencia cuando aumenta el número de datos a transmitir.

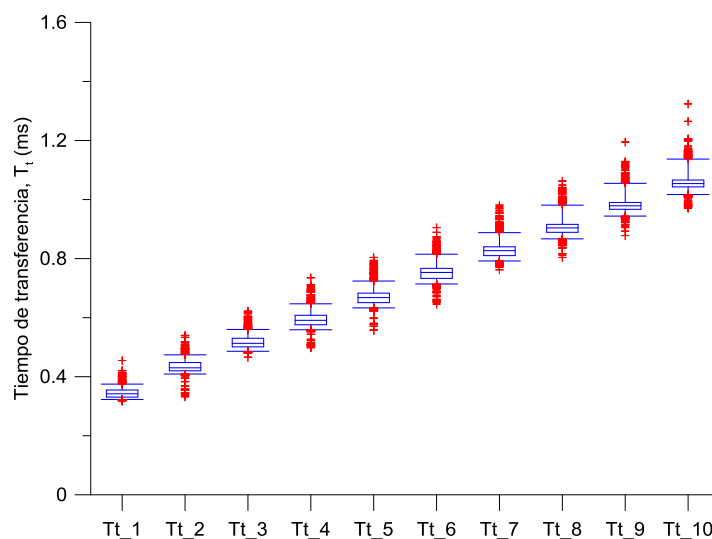


Figura 4.37. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  según número de datos.

La Figura 4.38 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos  $T_a$  correspondientes al procesamiento en el servidor para los diez ensayos. Si las gráficas de función de densidad para el tiempo de transferencia mostraban patrones similares, en este caso dicha similitud es aún mayor entre los diez ensayos. De hecho, de estas gráficas

se deduce que la gran mayoría de valores se agrupan en torno a un valor central, y que los que no lo hacen en su mayoría presentan un tiempo de procesamiento algo superior. Se observa también que para los diez ensayos aparece en las funciones de densidad una pequeña cresta de valores algo mayores que el valor central. Sin embargo el orden de magnitud de dicho conjunto de valores no permite afirmar que presenten un comportamiento bimodal.

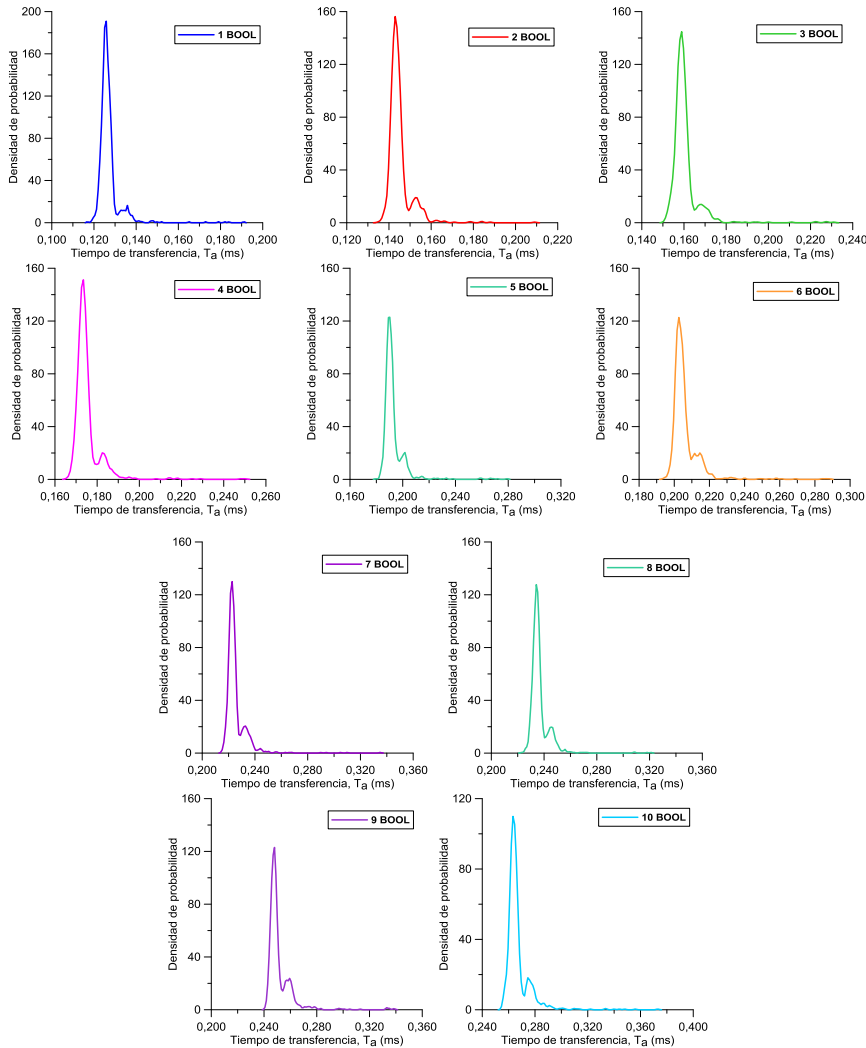


Figura 4.38. Funciones de densidad de  $T_A$  según el número de datos.

La Figura 4.39 muestra combinadas sobre una misma gráfica las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_A$  correspondientes al procesamiento en el servidor para los diez ensayos.

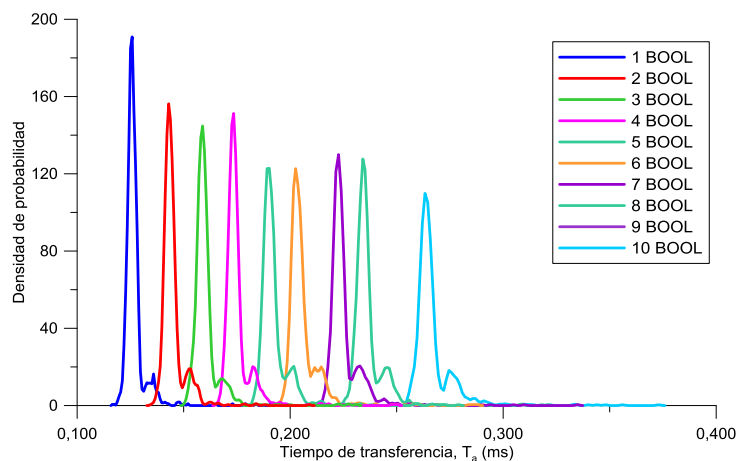


Figura 4.39. Comparativa de las funciones de densidad de  $T_a$  según el número de datos.

La Figura 4.40 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de procesamiento en el servidor  $T_a$  obtenidos para los diez ensayos.

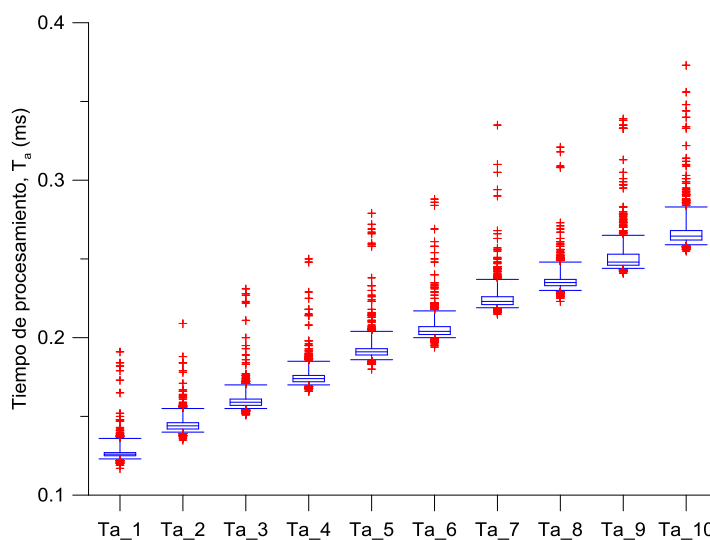


Figura 4.40. Comparativa de tiempos de procesamiento  $T_a$  según número de datos.

La Figura 4.41 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos  $T_c$  correspondientes al procesamiento en el cliente para los diez ensayos. Al igual que en los casos del tiempo total de transferencia  $T_t$  y del tiempo de procesamiento en el servidor  $T_a$ , en todos los ensayos se obtienen funciones de densidad con patrones similares. Sin embargo, esta similitud no es tan acentuada como en el caso del tiempo de procesamiento en el cliente.

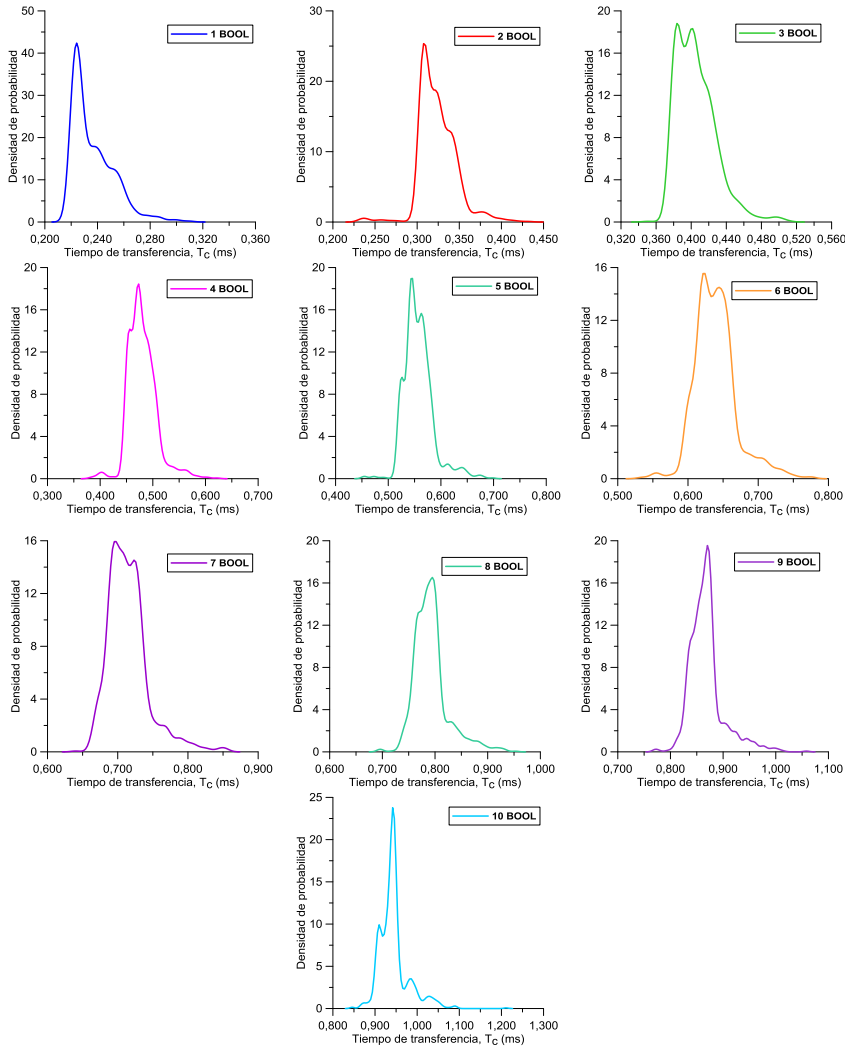


Figura 4.41. Funciones de densidad de  $T_c$  según el número de datos.

La explicación a esta diferencia de comportamiento se encuentra en el hecho de que el tiempo de procesamiento en el lado del servidor sólo depende de una serie de tareas cíclicas programadas para ser ejecutadas en cierto orden y sin factores externos que puedan influenciar el tiempo que precisan para su ejecución. Como se explicó en la metodología, básicamente se deben escribir los datos en el servidor y procesar su actualización, y el tiempo de ejecución de estas dos tareas está predeterminado por la capacidad de proceso del equipo.

Sin embargo, el procesamiento en el lado del cliente depende de factores externos ajenos a la ejecución cíclica de la máquina de estados que espera un mensaje y lo procesa. El principal factor es que el equipo cliente debe quedar a la espera de la recepción de un mensaje con los datos, y dicha recepción se puede demorar, ya sea por

contención en la pila de comunicaciones del servidor o por posible tráfico en la red, entre otros factores.

La Figura 4.42 muestra combinadas sobre una misma gráfica las funciones de densidad de los tiempos de procesamiento en el cliente  $T_c$  obtenidos para los diez ensayos. Aquí se pone de manifiesto, una vez más, la similitud entre las diferentes funciones de densidad, con la salvedad de que cada ensayo comporta tiempos mayores que el anterior.

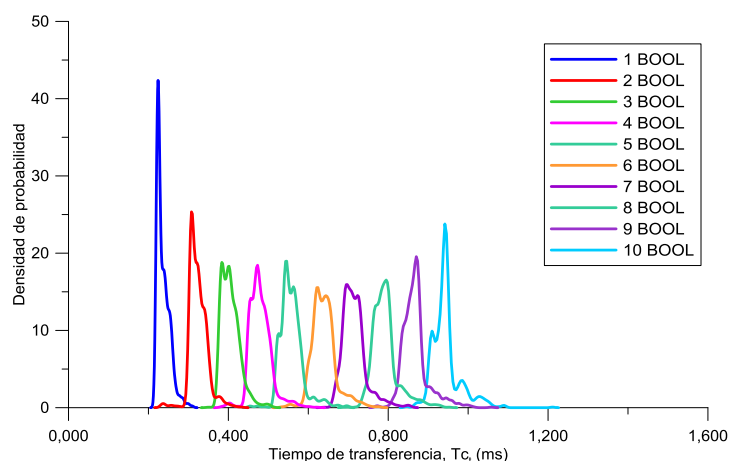


Figura 4.42. Comparativa de las funciones de densidad de  $T_c$  según el número de datos.

La Figura 4.43 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de procesamiento en el cliente  $T_c$  obtenidos para los diez ensayos.

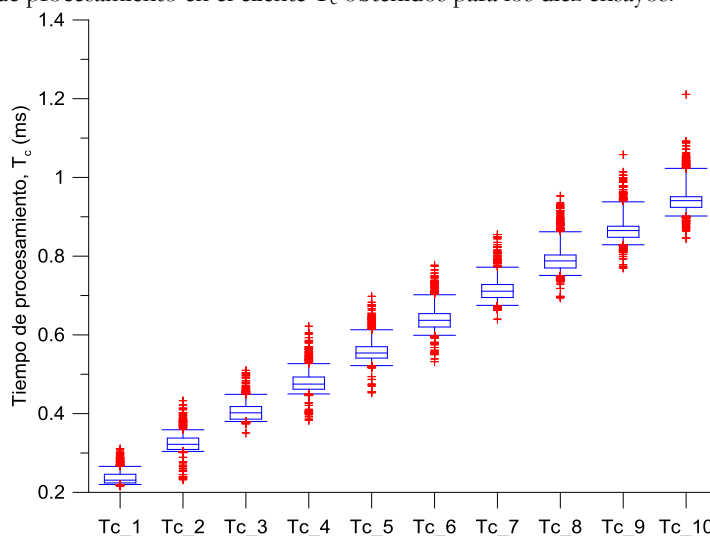


Figura 4.43. Comparativa de tiempos de procesamiento  $T_c$  según el número de datos.



Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.26 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos.

**Tabla 4.26. Valores estadísticos de la influencia del número de datos sobre  $T_t$**

Número de datos	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Min)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
1	0,345	0,342	0,326	0,137	0,024	0,013908	0,017902	0,000320
2	0,434	0,430	0,426	0,208	0,028	0,017228	0,023216	0,000539
3	0,517	0,513	0,509	0,156	0,029	0,018058	0,023371	0,000546
4	0,593	0,591	0,578	0,237	0,032	0,020571	0,028181	0,000794
5	0,670	0,668	0,652	0,247	0,032	0,020731	0,029035	0,000843
6	0,754	0,753	0,765	0,259	0,034	0,022592	0,031311	0,000980
7	0,829	0,827	0,830	0,219	0,029	0,021477	0,030496	0,000930
8	0,908	0,904	0,907	0,259	0,027	0,022865	0,033568	0,001127
9	0,984	0,979	0,984	0,317	0,023	0,021975	0,032996	0,001089
10	1,061	1,054	1,056	0,353	0,023	0,023781	0,035565	0,001265

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms<sup>2</sup>)

#### 4.2.2. Estudio de la influencia de los data sets y su actualización

En el apartado 2.4 se explicó que uno de los factores clave que podían afectar al tiempo de transferencia es el uso de los *data sets* para agrupar datos para su transmisión. Por ello, en este apartado se estudió la influencia del número *data sets* empleados, así como la distribución de los datos en dichos *data sets*, combinado con el número de llamadas a la función de actualización.

Se realizaron diferentes grupos de ensayos transmitiendo siempre diez objetos de datos. El tipo de dato seleccionado para todos los ensayos fue BOOL. Todos los datos pertenecían al mismo nodo lógico, tipo GGIO. Para cada ensayo, los diez datos fueron agrupados en diferente número de *data sets*. Sin embargo, el número de llamadas a la función de actualización vino impuesto por el número de *data sets*. A diferencia de lo que permite la librería PIS-10, se verificó experimentalmente que no se puede efectuar una llamada común a dicha función para varios datos pertenecientes a diferentes *data sets*. Dicho de otra forma, si los diez datos se agrupan en cinco *data sets*, la función de actualización debe ser llamada individualmente para cada *data set*. Y, por otro lado, al igual que sucede con la librería PIS-10, si se ejecuta la llamada a dicha función de actualización individualmente para varios datos pertenecientes al mismo *data set*, provoca el envío duplicado del mensaje correspondiente a todo el *data set*.

La Tabla 4.27 muestra un resumen de las características de los ensayos realizados.

Tabla 4.27. Resumen del estudio con *data sets*.

<b>Estudio</b>	Influencia de los <i>data sets</i> y su actualización
<b>Objetivo</b>	Determinar influencia de los <i>data sets</i> y las llamadas a la función de actualización sobre el tiempo de transferencia
<b>Tipo de datos</b>	BOOL
<b>Tipo de nodo lógico</b>	GGIO
<b>Número de datos</b>	10
<b>Número de <i>data sets</i></b>	1, 2, 5 y 10, según ensayo
<b>Número de ensayos</b>	4
<b>Número de medidas</b>	1000

La Tabla 4.28 muestra los grupos de datos que se ensayaron y como se distribuyeron en diferente número de *data sets*. La Tabla 4.29 muestra los valores medios de las principales magnitudes medidas para este grupo de ensayos. Para la primera parte de este estudio interesaba conocer fundamentalmente los valores del tiempo de transferencia total,  $T_t$ .

Tabla 4.28. Distribución de los datos en diferentes *data sets*.

Ensayo	Número de <i>data sets</i>	Datos y <i>data set</i> asociado									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DS01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DS02	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
DS05	5	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
DS10	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 4.29. Influencia del número de *data sets* sobre el tiempo de transferencia.

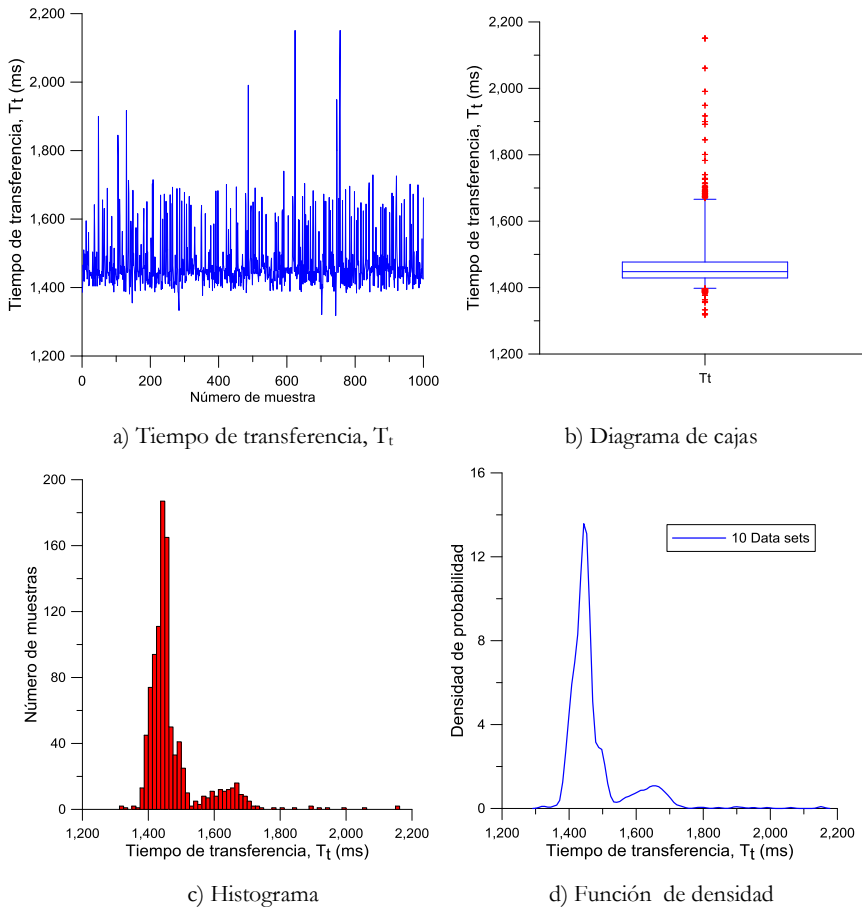
Ensayo	Longitud Trama	$T_t$	$T_a$	$T_c$
		medio	medio	medio
DS01	320	1,052	0,276	0,936
DS02	220	1,127	0,292	1,015
DS05	160	1,281	0,341	1,170
DS10	142	1,474	0,410	1,359

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

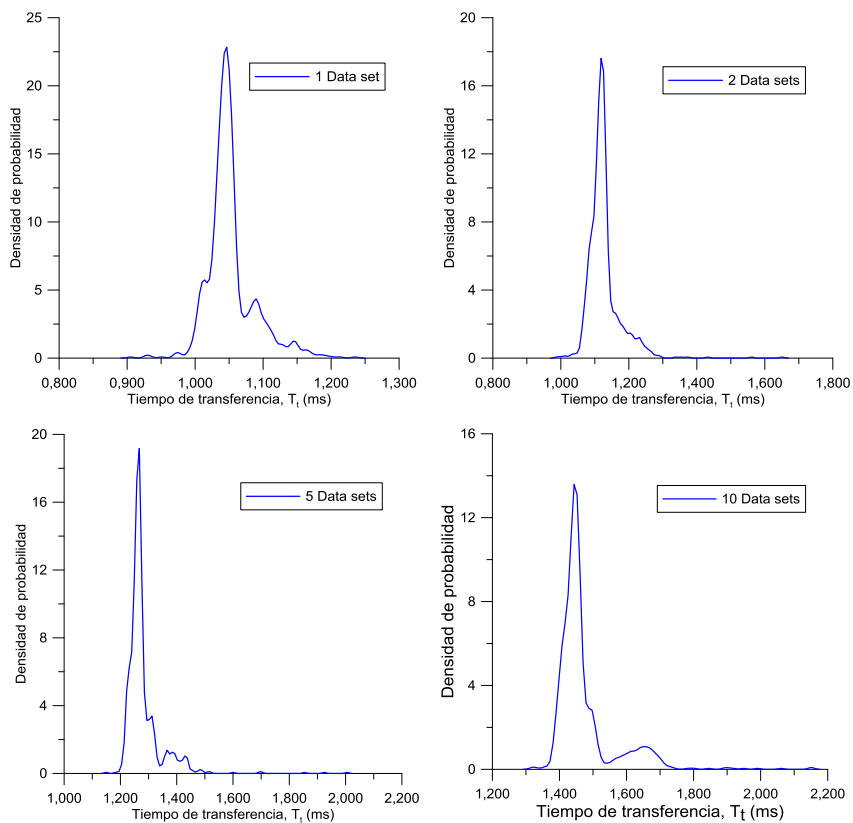
\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL.

La Figura 4.44 muestra gráficamente los resultados obtenidos para el tiempo de transferencia  $T_t$  cuando se transmitieron los diez datos tipo BOOL agrupados en diez *data sets* diferentes. En estas figuras se puede observar un comportamiento similar a los resultados obtenidos para el conjunto de ensayos del apartado 4.1.



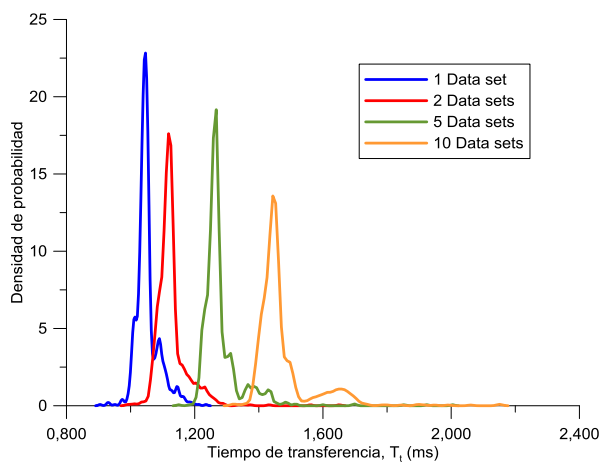
**Figura 4.44. Transferencia de diez datos tipo BOOL en diez *data sets*.**

La Figura 4.45 muestra individualmente las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los cuatro ensayos realizados variando el número de *data sets*.



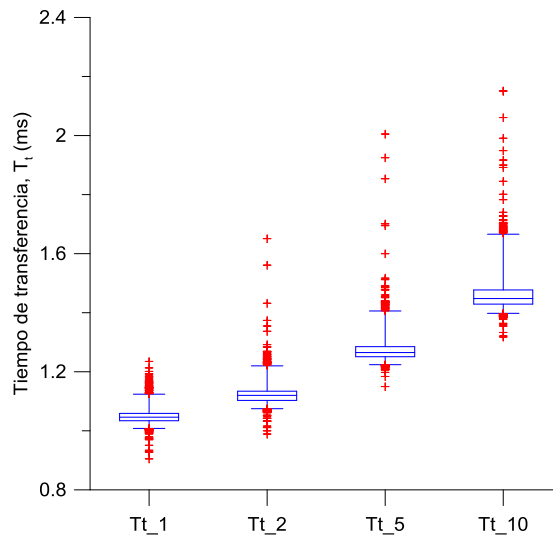
**Figura 4.45. Funciones de densidad de los ensayos con diferentes *data sets*.**

La Figura 4.46 muestra combinadas sobre una misma gráfica las funciones de densidad de los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los cuatro ensayos.



**Figura 4.46. Comparativa de las funciones de densidad variando el número de data sets.**

La Figura 4.47 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos de transferencia  $T_t$  obtenidos para los cuatro ensayos.



**Figura 4.47. Comparativa de tiempos de transferencia  $T_t$  con 1, 2, 5 y 10 *data sets*.**

Analizando los resultados mostrados desde la Figura 4.44 a la Figura 4.47 se observan patrones similares, con pequeñas variaciones de unos a otros. El resultado más relevante que se puede extraer de esta comparativa es que para todos los ensayos la gran mayoría de los valores medidos se agrupan en torno a un mismo valor central y una pequeña proporción se desvía de dicho valor. Estos valores que se desvían del valor central lo hacen, en general, introduciendo retardos adicionales. Del mismo modo, se aprecia claramente que conforme se incrementa el número de *data sets* en los que se distribuyen los diez datos, el tiempo de transferencia total aumenta.

La Figura 4.48 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos  $T_a$  de procesamiento en el servidor obtenidos para los cuatro ensayos.

Del mismo modo, la Figura 4.49 muestra mediante diagramas de cajas y sobre una misma gráfica los tiempos  $T_c$  de procesamiento en el cliente obtenidos para los cuatro ensayos.

Tanto la Figura 4.48 como la Figura 4.49 muestran que la agrupación de datos en mayor número de *data sets* se traduce en un incremento del tiempo de procesamiento, tanto en el lado del servidor como en el del cliente.

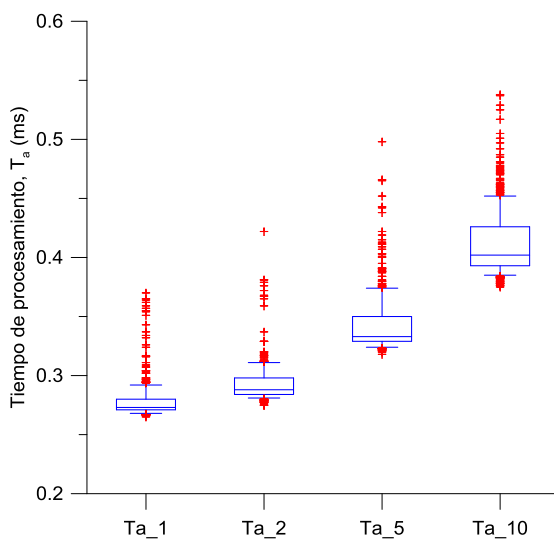


Figura 4.48. Comparativa de tiempos de procesamiento en el servidor  $T_a$  según número de *data sets*.

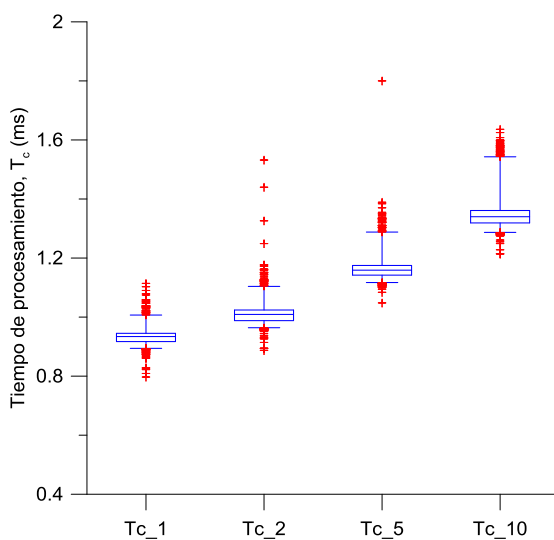


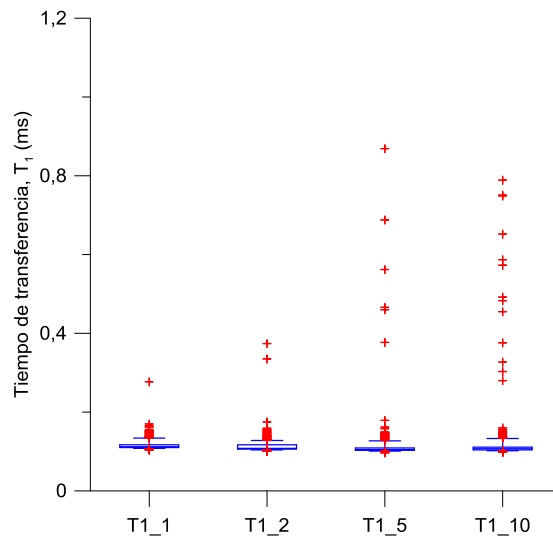
Figura 4.49. Comparativa de tiempos de procesamiento en el cliente  $T_c$  según número de *data sets*.

Al igual que se estudió en el apartado 4.1.3 la influencia conjunta de la forma en la que se agruparon y distribuyeron los datos en diferente número de *data sets* junto con el número de llamadas realizadas a la función de actualización, en este estudio se pretendía repetir los ensayos para la librería de comunicaciones industriales de *National Instruments*.

Sin embargo, la limitación impuesta por el hecho de que con la librería de *National Instruments* no se puede ejecutar una llamada común a la función de actualización para datos pertenecientes a diferentes *data sets* impidió analizar el efecto que causaría este factor sobre el tiempo de transferencia, tal como se analizó para la librería PIS-10.

Esto se verificó experimentalmente y el resultado fue que, al tratar de emplear una única llamada a la función de actualización para varios *data sets*, sólo se generaban los mensajes correspondientes al primer *data set* y los demás no. Esto se pudo comprobar gracias al uso del analizador de red Wireshark, que mostraba cómo iba variando el valor del parámetro “stNum” de los mensajes asociados al primer *data set*, mientras que para los mensajes asociados al resto de *data sets* dicho parámetro permanecía inalterado. Dicho parámetro “stNum” representa el número de estado y se incrementa cada vez que hay un cambio de estado en los datos. Los mensajes asociados al resto de *data sets* eran la mera repetición cíclica característica de un mensaje GOOSE cuando no hay cambios en los valores y no mostraban los cambios reales en los datos.

A pesar de esto, sí se pudo analizar la influencia de la agrupación de los datos en diferente número de *data sets* sobre el tiempo empleado para que los datos incluidos en el primer *data set* fueran extraídos por la pila de comunicaciones en el cliente. La Figura 4.50 representa el tiempo  $T_1$  en el cual se detectó la llegada del mensaje correspondiente al primer *data set* para los cuatro ensayos. Del mismo modo, la Figura 4.51 muestra el tiempo  $T_2$  en el cual se extrajo el valor del primer objeto de datos correspondiente al primer *data set* y la Figura 4.52 muestra el tiempo  $T_3$  en el cual se extrajo el primer *data set*.



**Figura 4.50.** Tiempo  $T_1$  en que es detectado el primer mensaje GOOSE según el número de *data sets*.

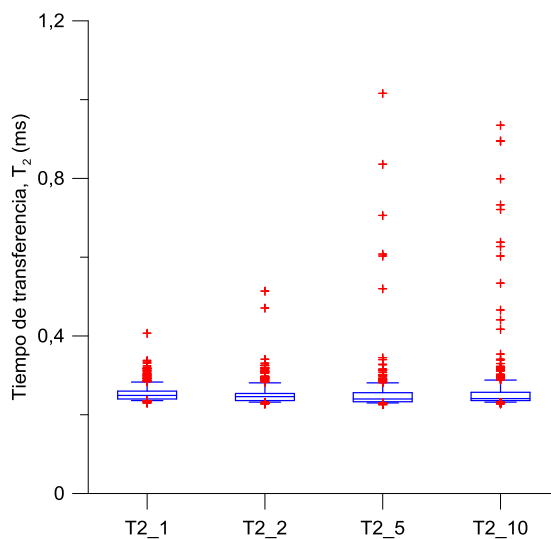


Figura 4.51. Tiempo  $T_2$  en que es extraído el primer objeto del primer *data set* según el número de *data sets*.

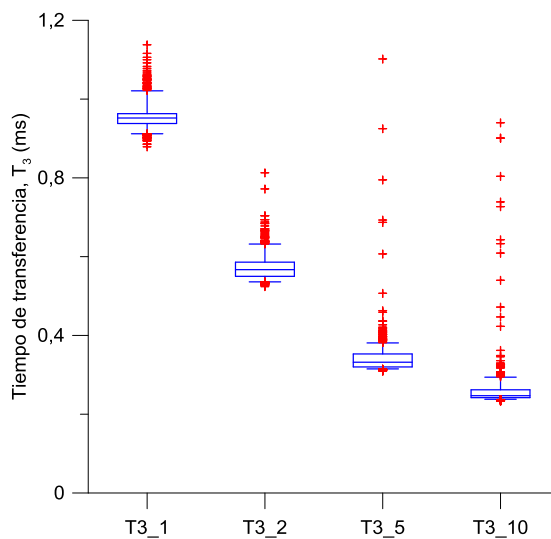
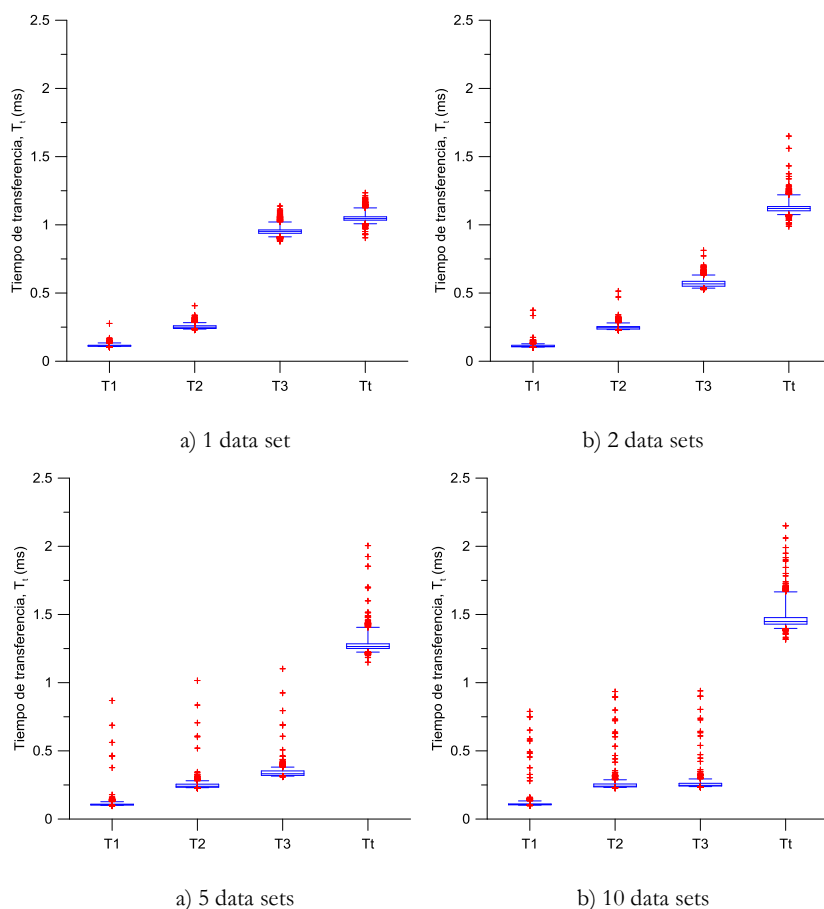


Figura 4.52. Tiempo  $T_3$  en que es extraído el primer *data set* del primer dato según el número de *data sets*.

La Figura 4.53 muestra la variación de los tiempos  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_t$  según varía el número de *data sets* que albergan los diez objetos de datos.





**Figura 4.53.** Variación de los tiempos T1, T2, T3 y Tt con diferentes *data sets*.

**Tabla 4.30.** Influencia de los *data sets* sobre tiempos parciales.

Ensayo	Tamaño Trama	T <sub>t</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
DS01	320	1,052	0,115	0,252	0,955
DS02	220	1,127	0,112	0,248	0,571
DS05	160	1,281	0,111	0,249	0,340
DS10	142	1,474	0,114	0,254	0,260

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.

\*\* Tamaño de trama expresado en bytes.

\*\*\* Objetos de datos tipo BOOL

Analizando los resultados mostrados de la Figura 4.50 a la Figura 4.53 se observa que, aunque el tiempo T<sub>1</sub> empleado para que el primer *data set* sea detectado por el cliente permanece prácticamente constante, para los cuatro ensayos el tiempo de extracción de dicho primer *data set* disminuyó al aumentar el número de data sets en que se distribuyeron y agruparon los diez objetos de datos. La Tabla 4.30 y la Figura 4.54

muestran los valores medios de estos tiempos y en las mismas se puede observar claramente dicha evolución.

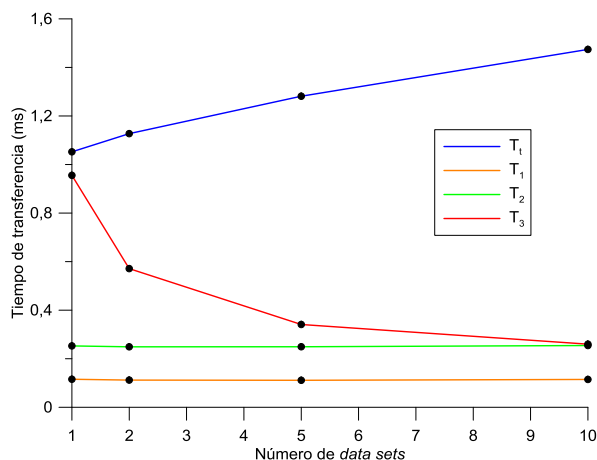


Figura 4.54. Influencia del número de *data sets* en el tiempo de transferencia.

Transmisión de 10 objetos de datos tipo **BOOL**, agrupados en 1, 2, 5 y 10 *data sets* con llamadas a la función de actualización en número coincidente con los *data sets*.

Para complementar la información obtenida de las gráficas, en la Tabla 4.31 se incluyen los valores estadísticos, centrales y de dispersión, de los tiempos de transferencia  $T_t$  medidos en los ensayos.

Tabla 4.31. Valores estadísticos de la influencia del número de *data sets* sobre  $T_t$

Número de <i>data sets</i>	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango (Max-Min)	Rango Intercuartil (75%-25%)	Desviación Media Absoluta	Desviación Típica	Varianza
1	1,052	1,046	1,046	0,330	0,024	0,024206	0,035425	0,001255
2	1,127	1,120	1,123	0,662	0,031	0,030327	0,048566	0,002359
5	1,281	1,265	1,271	0,855	0,034	0,039103	0,065412	0,004279
10	1,474	1,448	1,444	0,833	0,048	0,058182	0,089419	0,007996

\* Todos los valores están expresados en milisegundos (ms), a excepción de la varianza (ms<sup>2</sup>)

### 4.2.3. Estudio de la influencia de los nodos lógicos

Los nodos lógicos definidos en IEC 61850 que modelan el sistema eléctrico contienen diferente número y tipo de objetos de datos. Los datos pueden ser del mismo o diferente tipo básico [35]. Según esto, un mismo tipo de dato puede estar presente en diferentes estructuras de nodos lógicos. Se realizó una serie de ensayos para determinar la posible influencia del tipo de nodo lógico sobre el tiempo de transferencia con la librería de *National Instruments*. En este caso se optó por repetir los ensayos de influencia del número de objetos de datos con datos tipo BOOL, pero contenidos en nodos lógicos de tipo MMXU en lugar de GGIO.

La Tabla 4.32 muestra un resumen de las características de los ensayos realizados.

**Tabla 4.32. Resumen del estudio con nodos lógicos.**

<b>Estudio</b>	Influencia de los nodos lógicos
<b>Objetivo</b>	Determinar influencia de los <i>data sets</i> y las llamadas a la función de actualización sobre el tiempo de transferencia
<b>Tipo de datos</b>	BOOL
<b>Tipo de nodo lógico</b>	GGIO y MMXU
<b>Número de datos</b>	Variable, de 1 a 10
<b>Número de data sets</b>	1
<b>Número de ensayos</b>	10
<b>Número de medidas</b>	1000

La Tabla 4.33 muestra los resultados obtenidos de los ensayos con nodo lógico tipo GGIO y la Tabla 4.34 los resultados obtenidos con nodo lógico tipo MMXU.

**Tabla 4.33. Influencia del tipo de nodo lógico (GGIO).**

Número objetos	Nodo Lógico GGIO			
	Tamaño Trama	T <sub>t</sub> medio	T <sub>a</sub> medio	T <sub>c</sub> medio
1	137	0,345	0,127	0,237
2	158	0,434	0,145	0,324
3	178	0,516	0,160	0,406
4	198	0,593	0,175	0,480
5	218	0,670	0,193	0,557
6	238	0,754	0,206	0,639
7	259	0,829	0,225	0,715
8	279	0,907	0,237	0,792
9	300	0,984	0,252	0,868
10	320	1,060	0,267	0,944

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.  
 \*\* Tamaño de trama expresado en bytes.  
 \*\*\* Objetos de datos tipo BOOL

Tabla 4.34. Influencia del tipo de nodo lógico (MMXU).

Nodo Lógico MMXU				
Número objetos	Tamaño Trama	$T_t$ medio	$T_a$ medio	$T_c$ medio
1	143	0,288	0,115	0,182
2	170	0,374	0,129	0,267
3	196	0,456	0,149	0,350
4	222	0,529	0,162	0,423
5	249	0,617	0,184	0,511
6	275	0,679	0,197	0,571
7	302	0,763	0,210	0,652
8	328	0,848	0,227	0,737
9	354	0,926	0,240	0,813
10	381	1,015	0,249	0,901

\*Valores medios de los tiempos expresados en ms.  
 \*\* Tamaño de trama expresado en bytes.  
 \*\*\* Objetos de datos tipo BOOL.

Con objeto de una mejor visualización de los resultados, la Figura 4.55 muestra una comparativa de los valores medios de los tiempos  $T_t$ ,  $T_a$  y  $T_c$ . En esta se observa que el comportamiento es similar en ambos casos, con tiempos algo mayores en el caso de emplear un nodo lógico tipo GGIO. Esto está en contraposición a lo que sucedió al realizar este mismo ensayo con la librería PIS-10, donde se observó que el nodo lógico GGIO permitía obtener menores tiempos de transferencia. Esto pone de manifiesto que el tipo de nodo lógico influye sobre los tiempos de transferencia, pero no en la misma medida en diferentes implementaciones del sistema de comunicaciones IEC 61850.

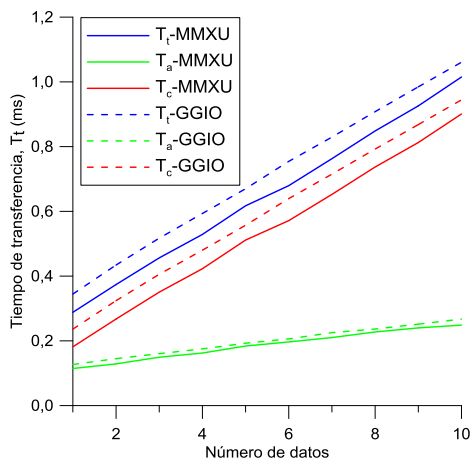


Figura 4.55. Comparativa de nodos lógicos GGIO y MMXU.

### 4.3. Integración de IEC 61850 en controladores basados en VxWorks

En este apartado se describen los resultados obtenidos en el desarrollo de la versión preliminar de un módulo serie C para incorporar a los controladores cRIO que no incorporan el sistema operativo Linux-RT, con objeto de dotarles de los servicios de comunicación GOOSE de IEC 61850. El objetivo planteado era el desarrollo de un módulo que hiciera de interfaz entre el cRIO y la plataforma de desarrollo DK61.

#### 4.3.1. Diseño del hardware

Después de analizar las posibilidades que ofrecía el MDK se procedió al diseño del circuito adecuado para hacer de interfaz entre el chasis del controlador cRIO y la placa de desarrollo DK61, con objeto de establecer un enlace entre el cRIO y el controlador SC-143 de Beck IPC. La Figura 4.56 muestra el diagrama de bloques global de la configuración que se pretendía implementar, en la cual se aprecia que el módulo a desarrollar era un elemento intermediario entre el controlador cRIO y la plataforma DK61. Al módulo desarrollado se le dio el nombre de “UCO61850”

Aunque no es obligatorio, se diseñó el módulo para que tuviera los dos modos de funcionamiento descritos en el apartado 3.2.3, ya que para la aplicación a la que iba a ser destinado sí necesitaba ambos modos. Así pues, el diseño del circuito para el módulo implicó dos partes distintas. Por un lado se diseñó la circuitería necesaria para que el controlador cRIO pudiera acceder a la memoria EEPROM al encontrarse en modo de identificación, ID. Para ello se empleó una memoria EEPROM con bus *Serial Peripheral Interface* (SPI). Por otro lado se tuvo que diseñar la circuitería apropiada para que el controlador cRIO pudiera acceder mediante el bus SPI al controlador SC-143 albergado en la placa DK61.

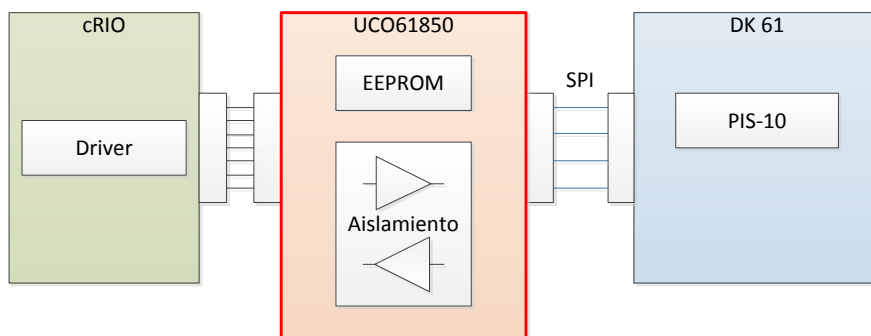


Figura 4.56. Diagrama de bloques de la plataforma para conectar cRIO y DK61.

La placa de circuito impreso fue diseñada con el software Multisim y se envió a una empresa especializada en fabricación de circuitos impresos, a la cual también se le encargó el *stencil* para el proceso de estañado. Todos los componentes de la placa eran de montaje superficial, a excepción de los conectores. En el laboratorio se procedió al estañado de la placa empleando el *stencil* y pasta de soldadura. Se colocaron todos los

componentes SMD mediante la máquina *Pick&Place* del departamento y se procedió al soldado de los componentes mediante el horno de refusión. Por último, se soldaron manualmente los conectores, dando por terminado el montaje de la placa, tal como se muestra en la Figura 4.57. En la Figura 4.58 se muestra la placa de circuito impreso totalmente montada junto con las carcasas que conforman el módulo final. La Figura 4.59 y la Figura 4.60 muestran el aspecto final del módulo ya terminado y listo para las primeras pruebas.



Figura 4.57. Placa de circuito impreso para el módulo UCO61850.



Figura 4.58. Componentes del módulo UCO61850 antes de ensamblar.



**Figura 4.59.** Vista frontal del módulo UCO61850 terminado.



**Figura 4.60.** Vista trasera del módulo UCO61850 terminado.

#### **4.3.2. Pruebas de funcionamiento**

Una vez concluido el desarrollo del módulo se procedió a realizarle diversas pruebas eléctricas de funcionamiento, con objeto de detectar algún posible fallo de diseño que pudiera poner en peligro al controlador cRIO cuando se procediera a la inserción del módulo.

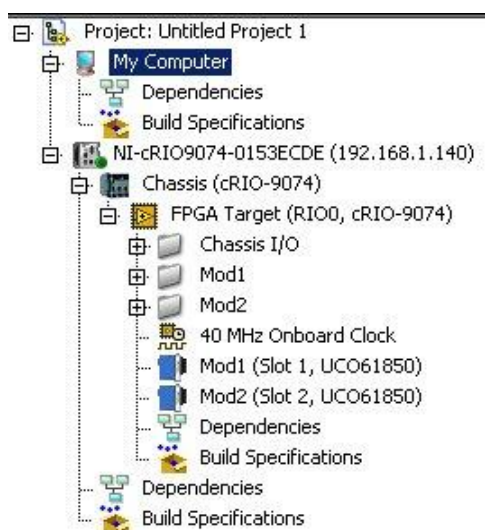
Para estas pruebas, se procedió a aplicar diferentes niveles de tensión a las líneas eléctricas procedentes del cRIO que entran al módulo. Se verificó que según se aplicaban estas señales responsables del cambio de modo del módulo, éste respondió correctamente. Del mismo modo, se procedió a inyectar señales para verificar el comportamiento de los circuitos de buffer/aislamiento, para los cuales también se obtuvo el comportamiento deseado. Por último, se procedió a inyectar una señal de

onda cuadrada de 1 MHz para simular la señal de reloj necesaria para la comunicación SPI, obteniendo también el comportamiento esperado.

Así pues, una vez realizado el test eléctrico, se decidió insertar el módulo UCO61850 en un controlador cRIO 9074 y observar su comportamiento. El resultado fue según lo esperado, no se detectó ninguna anomalía en el cRIO, por lo cual el módulo estaba listo para pasar a la siguiente fase.

Una vez superado el test eléctrico y de inserción en el cRIO, el módulo aún era “invisible” al cRIO. Para que el controlador pudiera reconocer al módulo había que programar su memoria EEPROM, en la cual se almacenaban, entre otros, los parámetros de identificación. Entre los parámetros que se incluyeron en el fichero de configuración, se encontraba el “Module Name”, al cual se le dio el valor “UCO61850”.

Mediante las utilidades aportadas en el MDK, se procedió a cargar el contenido del fichero de configuración en la memoria EEPROM. La operación se realizó con éxito, sin ningún tipo de error.



**Figura 4.61. Proyecto de prueba con dos módulos UCO61850.**

Una vez concluido el proceso de grabación de la EEPROM, se procedió con el test de reconocimiento, para lo cual se creó un nuevo proyecto para el controlador y se verificó que fue capaz de reconocer e identificar al módulo UCO61850 sin ningún tipo de incidencia. La Figura 4.61 muestra una captura de pantalla de un proyecto que se creó para verificar la coexistencia de dos módulos UCO61850. También se verificó la compatibilidad del módulo con el controlador singleBoardRIO (sbRIO), obteniendo los mismos resultados positivos.

Posteriormente se procedió con el test final para la verificación de funcionamiento del interfaz SPI al cual se conectaría la placa DK61. Para ello, se creó un VI para el envío periódico (cada 1 ms) de 3 bytes, con objeto de monitorizar en el osciloscopio las líneas MOSI y SPI CLK. El resultado fue satisfactorio.



Por tanto, una vez superadas todas las pruebas descritas, el módulo estaba listo para ser conectado a la placa DK61. Puesto que esta placa lleva unos indicadores LED conectados a las salidas digitales del SC-143, se diseñó una pequeña rutina que transmitiera desde el cRIO un número y, dicho número, al ser recibido via SPI por la placa DK61, se interpretaba para activar el LED correspondiente. En esta ocasión, el test también mostró el comportamiento esperado sin ningún tipo de incidencia.

Llegados a este punto se concluyó que el diseño físico del módulo UCO61850 cumplía con todos los requerimientos que se le exigían. El siguiente paso era desarrollar el driver apropiado para poder integrar el módulo en aplicaciones.

#### 4.3.3. Desarrollo del driver

El desarrollo del driver implicó la creación de un programa que se ejecutara en la placa DK61 y que gestionara el intercambio de información con el cRIO para, por ejemplo, recibir un dato y procesarlo para su transmisión. Del mismo modo el driver en el lado del cRIO también se debía encargar de procesar las comunicaciones a través de SPI.

Tras varias versiones del driver a ambos lados, se logró una primera versión operativa. Se dispuso una configuración de test consistente en un controlador cRIO 9074 al cual se le insertó el módulo UCO61850. A este módulo se le conectó, mediante las líneas SPI, la placa DK61. Esta placa DK61 fue conectada a su vez, mediante un cable Ethernet, a un *switch* convencional. Finalmente, actuando como cliente, se dispuso otra placa DK61 conectada al mismo *switch*.

En base a esta configuración, se provocó el cambio en un dato BOOL en el cRIO 9074, lo cual implicó la generación del correspondiente mensaje GOOSE, que fue recibido correctamente por la placa DK61 cliente.

La Figura 4.62 muestra el esquema de conexiones del primer escenario de pruebas con el módulo UCO61850. La Figura 4.63 muestra el escenario real en el que se probó por primera vez el correcto funcionamiento del módulo UCO61850.

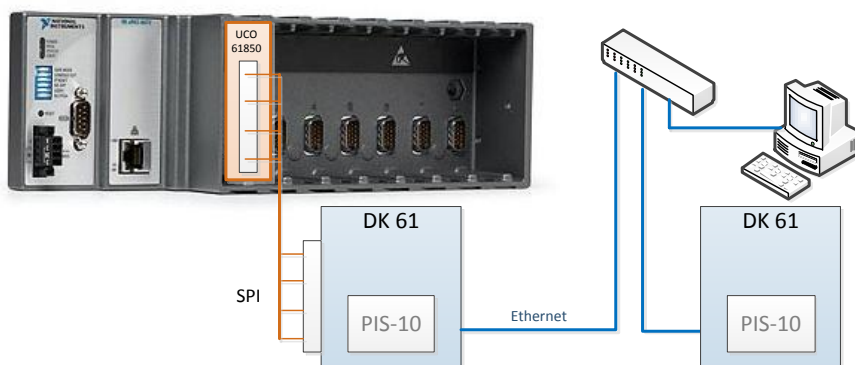


Figura 4.62. Primera configuración de pruebas con UCO61850.

Después de esta prueba de funcionamiento, se modificó el driver para que también pudiera actuar como cliente. Una vez hecho esto, se procedió a realizar un ensayo en el cual un controlador cRIO 9074 se comunicara a través de 61850 con un controlador sbRIO, estando cada uno de ellos conectados a una placa DK61 mediante sendos módulos UCO61850. La Figura 4.64 muestra el esquema de conexiones de la segunda configuración de prueba para establecer la comunicación entre un cRIO 9074 y un sbRIO 9602.



Figura 4.63. Escenario de las primeras pruebas con UCO61850.

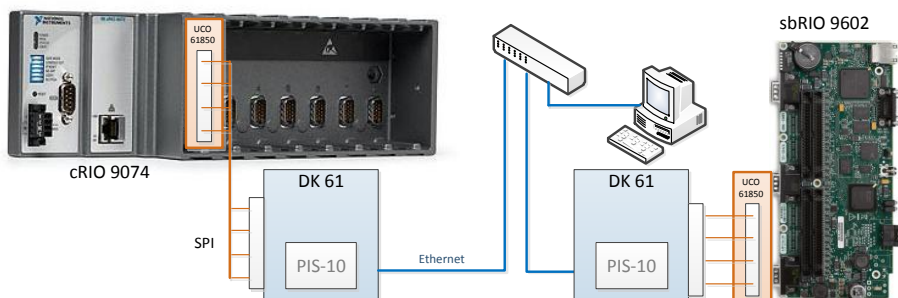


Figura 4.64. Segunda configuración de pruebas con UCO61850.

Basados en esta primera configuración completa, el equipo servidor fue capaz de publicar cambios en un dato tipo BOOL que fueron recibidos por el equipo cliente (sbRIO).

Con objeto de medir los tiempos de transferencia, se sincronizaron ambos controladores mediante el protocolo de tiempo de precisión (PTP) IEEE 1588. Marcando el instante en el cual se producía un cambio en el equipo servidor y cuando era recibido dicho cambio, para las primeras pruebas se obtuvieron tiempos mayores de 10 ms. Tras varias revisiones del diseño de los drivers para el módulo, se lograron reducir los tiempos de transferencia, por debajo de 4 ms.

Con estas pruebas concluyó esta fase de diseño preliminar del módulo de comunicaciones UCO61850.

#### 4.4. Integración de IEC 61850 en un analizador de calidad de suministro

En este apartado se describen los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de datos IEC 61850 a un PQA para su utilización con los inversores de una planta fotovoltaica experimental como parte de los trabajos desarrollados en el grupo de investigación TIC-240 de la Universidad de Córdoba, en el marco del proyecto PV-ONTIME, “Sistema inteligente de producción, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica on-time” [81].

##### 4.4.1. Modelo para la medida de continua

Para la medida de los parámetros de continua se utilizaron los VI “*Basic Averaged DC-RMS*” de la librería de procesamiento de señal. Para el modelado según IEC 61850 de los parámetros medidos se utilizó el nodo lógico MMDC, cuya finalidad es modelar los parámetros característicos de un sistema de continua, tales como tensión, corriente o potencia. Todos los objetos de datos incluidos en este tipo de nodo lógico pertenecen a la CDC MV (*Measured value*). La Figura 4.65 y la Tabla 4.35 muestran el uso de estos VI y la relación de las variables con el modelo IEC 61850.

Para la asignación de las variables al modelo de datos IEC 61850 hubo que crear la estructura apropiada de nodos lógicos y objetos de datos mediante el correspondiente fichero SCL de configuración, como se muestra gráficamente en la Figura 4.65.

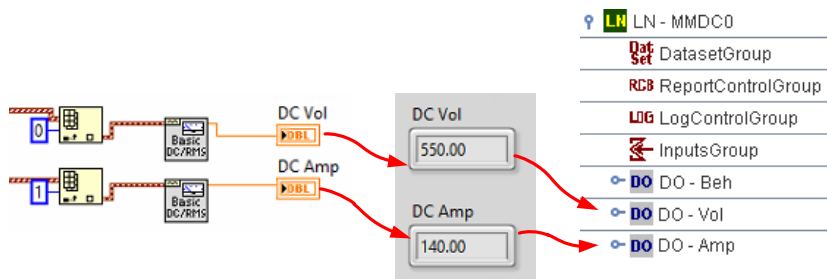


Figura 4.65. Relación de variables de continua con objetos de datos IEC 61850.

Tabla 4.35. Relación de variables de continua con objetos de datos IEC 61850.

Signal Processing		IEC 61850 data model		
Vi	Parameter	Data Object	CDC	LN
Basic Averaged DC-RMS	DC Vol Value	Vol	MV	MMDC
Basic Averaged DC-RMS	DC Amp Value	Amp	MV	MMDC

4.4.2. Modelo para la medida de alterna

Para la obtención de los parámetros de alterna se emplearon los VI “RMS (10 or 12 cycles)” y “Averaged Frequency (Half cycle)” de la EPS. De este modo se obtuvieron las tensiones y corrientes de fases, así como la frecuencia. Respecto al modelo de datos IEC 61850, para los parámetros de alterna, al tratarse de una función de medida, se utilizó el nodo lógico MMXU (*Measurement*). Los objetos de datos utilizados para representar los valores de las tensiones fase-neutro (PNV) y corrientes de fase (A) pertenecen a la CDC WYE (*Phase to ground related measured values of a three phase system*), mientras que los utilizados para representar la frecuencia pertenecen a la CDC MV. La CDC WYE se utiliza para representar una colección simultánea de medidas de valores en un sistema trifásico. La Figura 4.66 y la Tabla 4.36 muestran el uso de estos VI y la relación de las variables con el modelo IEC 61850.

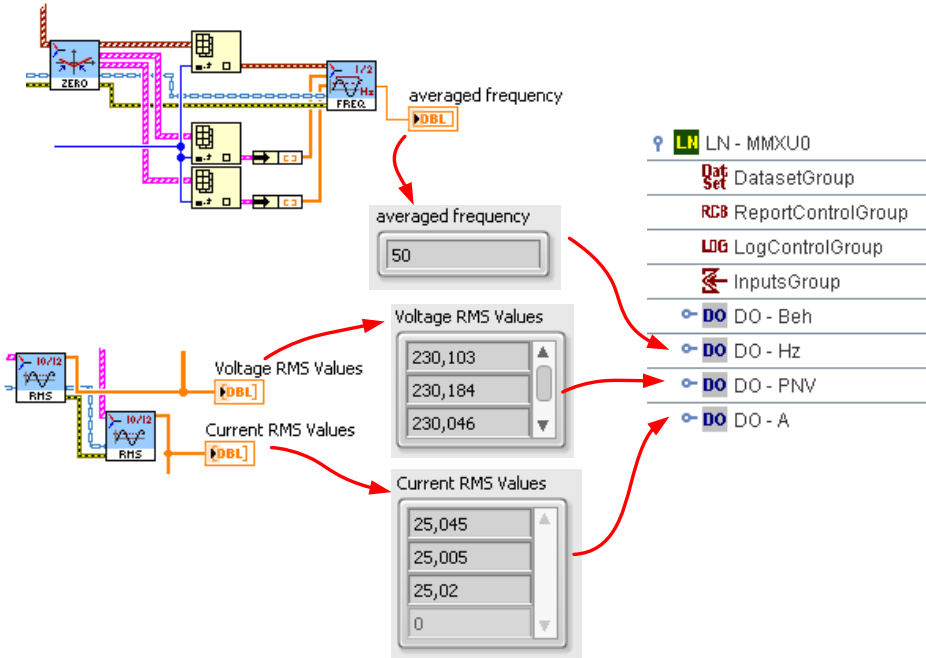


Figura 4.66. Relación de variables de alterna con objetos de datos IEC 61850.

Para la asignación de las variables al modelo de datos IEC 61850 hubo que crear la estructura de nodos lógicos y objetos de datos correspondiente mediante el fichero SCL de configuración, tal como se ilustra en la Figura 4.66.

Tabla 4.36. Relación de variables de alterna con objetos de datos IEC 61850.

Electrical Power Suite		IEC 61850 data model		
Vi	Parameter	Data Object	CDC	LN
RMS (10 or 12 cycles)	Voltage RMS Values	PNV	WYE	MMXU
RMS (10 or 12 cycles)	Current RMS Values	A	WYE	MMXU
Frequency (Half cycle)	Averaged frequency	Hz	MV	MMXU

4.4.3. Modelo para las medidas de potencia y energía

Para la obtención de los parámetros de potencia se utilizaron los VI “Power Values” de la EPS. La Figura 4.67 ilustra el uso de estos VI. De este modo se obtuvo la potencia activa, reactiva y aparente, así como el factor de potencia. Del mismo VI se obtuvieron los parámetros de potencia activa, reactiva y aparente totales. Respecto al modelo de datos IEC 61850, para los parámetros de potencia, al tratarse de una función de medida, se utilizó el nodo lógico MMXU (*Measurement*). La Tabla 4.37 detalla el uso de estos VI y la relación de las variables de potencia con el modelo IEC 61850.

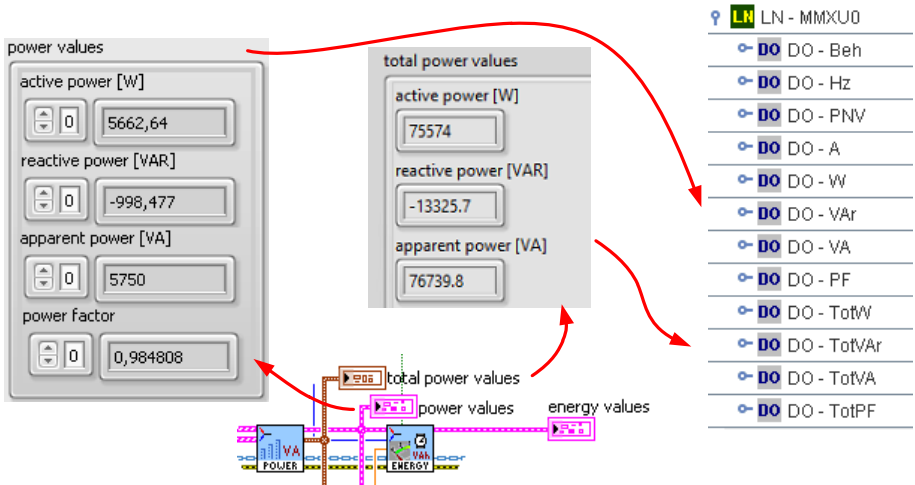


Figura 4.67. Relación de variables de potencia con objetos de datos IEC 61850.

Tabla 4.37. Relación de variables de potencia con objetos de datos IEC 61850.

Electrical Power Suite		IEC 61850 data model		
Vi	Parameter	Data Object	CDC	LN
Power Values	Total active power [W]	TotW	MV	MMXU
Power Values	Total reactive power [VAr]	TotVAr	MV	MMXU
Power Values	Total apparent power [VA]	TotVA	MV	MMXU
Power Values	Active power [W]	W	WYE	MMXU
Power Values	Reactive power [VAr]	VAr	WYE	MMXU
Power Values	Apparent power [VA]	VA	WYE	MMXU
Power Values	Power factor	PF	WYE	MMXU

Para la obtención de los parámetros de energía se emplearon los VI “Energy Values” de la EPS. La Figura 4.68 ilustra el uso de estos VI. De este modo se obtuvo la energía activa (real), reactiva y aparente. Para los parámetros de energía, al tratarse de una función de medida, se utilizó el nodo lógico MMTR (*Metering 3 Phase*). Se utilizaron los objetos de datos TotVAh, TotWh y TotVARh, de la CDC BCR (*Binary counter reading*). La Tabla 4.38 refleja como se utilizaron estos VIs y la relación de las variables de energía con el modelo IEC 61850.

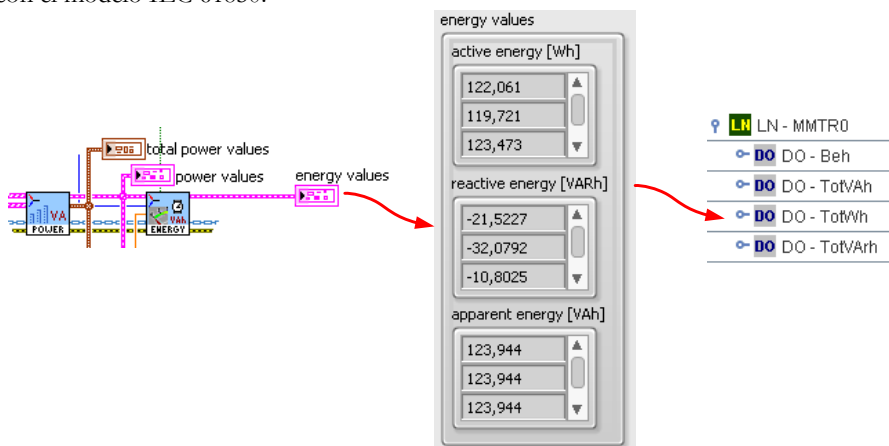


Figura 4.68. Relación de variables de energía con objetos de datos IEC 61850.

Tabla 4.38. Relación de variables de energía con objetos de datos IEC 61850.

Electrical Power Suite		IEC 61850 data model		
Vi	Parameter	Data Object	CDC	LN
Energy Values	Active energy [Wh]	TotVWh	BCR	MMTR
Energy Values	Reactive energy [VARh]	TotVARh	BCR	MMTR
Energy Values	Apparent energy [VAh]	TotVAh	BCR	MMTR

#### 4.4.4. Modelo para las medidas de calidad de suministro

Para la detección de eventos tales como huecos, sobretensiones o interrupciones se utilizó el VI “Voltage Dips, Swells and Interruptions” de la EPS. De este modo se obtuvieron los valores de magnitud y duración temporal, así como el tipo de evento y la fase en la cual son detectados. Para la representación de estos eventos se utilizó el nodo lógico QVVR (*Voltage variation*). La Figura 4.69 y la Tabla 4.39 ilustran como se utilizaron estos VI y la relación de los parámetros con el modelo IEC 61850.

De los objetos de datos del LN QVVR, el único objeto “mandatory” es VarStr (Start – voltage variation event in progress), que indica que hay una variación de tensión en curso. Este objeto es de la CDC SPS, cuyos atributos “mandatory” son stVal, q y t. Del mismo modo, se puede indicar que hay un *voltage dip*, *swell* o *interruption* por medio de los objetos opcionales DipStr, SwlStr e IntrStr, de la CDC SPS.

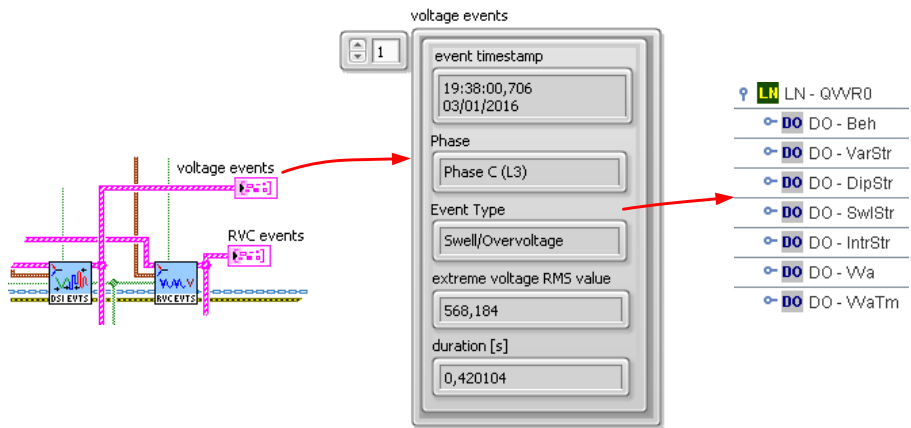


Figura 4.69. Relación entre parámetros de eventos y objetos de datos IEC 61850.

Tabla 4.39. Relación entre parámetros de eventos y objetos de datos IEC 61850.

Electrical Power Suite		IEC 61850 data model		
Vi	Parameter	Data Object	CDC	LN
Voltage Dips, Swells and Interruptions	event timestamp	VarStr\$t	SPS	QVVR
Voltage Dips, Swells and Interruptions	event type:	VarStr\$stVal	SPS	QVVR
Voltage Dips, Swells and Interruptions	Swell/Overvoltage	VarSwl\$stVal		
Voltage Dips, Swells and Interruptions	event type:	VarStr\$stVal	SPS	QVVR
Voltage Dips, Swells and Interruptions	Dip/Undervoltage	VarDip\$stVal		
Voltage Dips, Swells and Interruptions	event type: Interruption	VarStr\$stVal	SPS	QVVR
Voltage Dips, Swells and Interruptions	extreme voltage	VarIntr\$stVal		
Voltage Dips, Swells and Interruptions		VVa	MV	QVVR
Voltage Dips, Swells and Interruptions	duration	VVaTm	MV	QVVR

Para la detección de transitorios de tensión se utilizó el VI “*Rapid Voltage Changes*” de la EPS. De este modo se obtuvieron los valores de magnitud y duración temporal de los transitorios, así como de la fase en la cual son detectados. Para la representación de estos eventos se utilizó el nodo lógico QVTR (Voltage variation). La Figura 4.70 y la Tabla 4.40 ilustran como se utilizó este VI y la relación de los parámetros con el modelo IEC 61850.

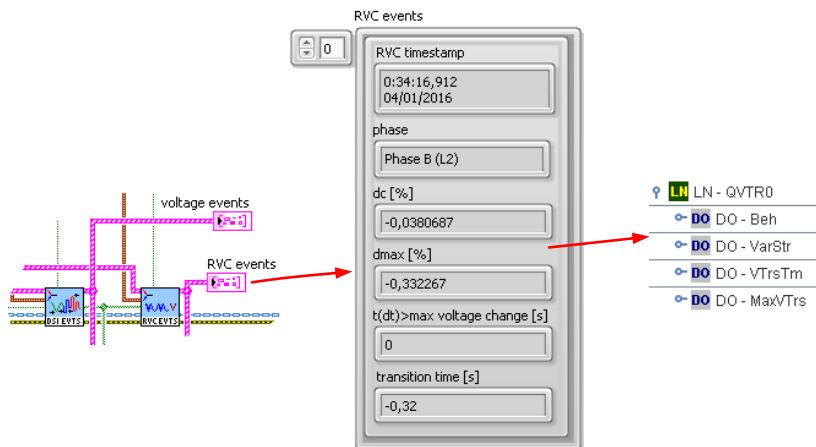


Figura 4.70. Relación entre parámetros de cambios rápidos de tensión y objetos de datos IEC 61850.

Tabla 4.40. Relación entre parámetros de cambios rápidos de tensión y objetos de datos IEC 61850.

Electrical Power Suite		IEC 61850 data model		
Vi	Parameter	Data Object	CDC	LN
Rapid Voltage Changes	RVC timestamp	VarStr\$t	SPS	QVTR
Rapid Voltage Changes	phase	VarStr\$stVal	SPS	QVTR
Rapid Voltage Changes	dmax	MaxVTrs	MV	QVTR
Rapid Voltage Changes	t(dt)>max voltage change	VTrsTm	MV	QVTR

#### 4.4.5. Verificación de funcionamiento

Para verificar el correcto funcionamiento de la aplicación del modelo de datos se procedió a realizar las comprobaciones descritas en el apartado 3.3. Para la primera etapa del estudio que aborda esta tesis se propuso verificar la correcta transmisión de las siguientes magnitudes y eventos:

- Variación de tensión continua.
- Variación de corriente continua.
- Variación de tensión alterna.
- Variación de corriente alterna.
- Variación de valores de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia.



- Variación de valores de energía activa, reactiva y aparente.
- Huecos de tensión.
- Transitorios de tensión.

Las pruebas realizadas confirmaron los resultados esperados. La aplicación del modelo de datos y servicios de comunicación permitieron que los cambios provocados en el servidor fueran recibidos adecuadamente en el cliente, para todas las magnitudes objeto de estudio. De la Figura 4.71 a la Figura 4.76 se muestran las pantallas de las aplicaciones cliente y servidor que se emplearon para verificar la correcta transmisión de los parámetros propuestos.

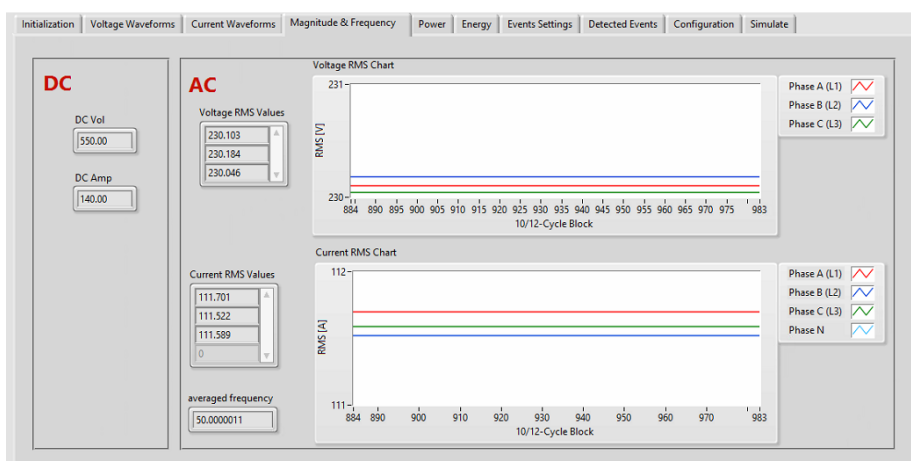


Figura 4.71. Magnitudes de continua y alterna en el servidor.

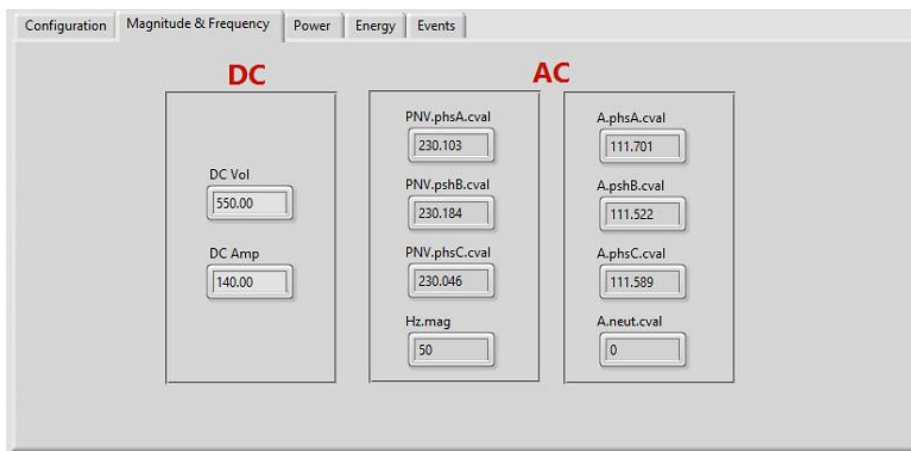


Figura 4.72. Magnitudes de continua y alterna en el cliente.

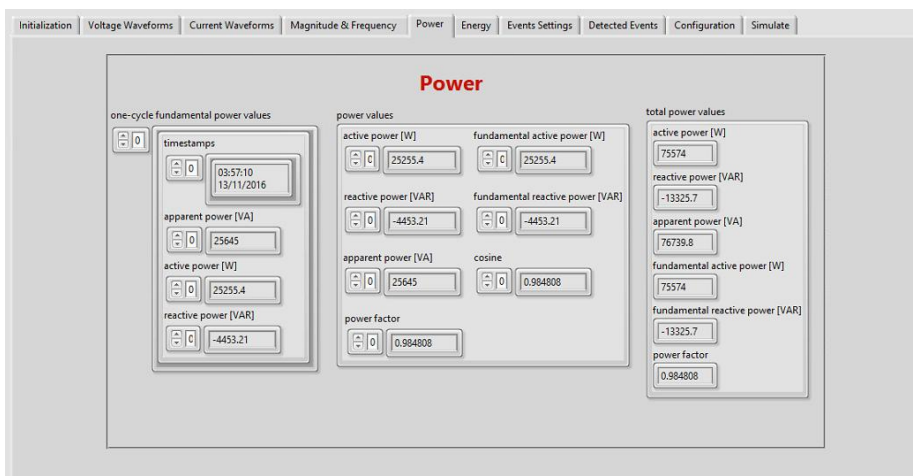


Figura 4.73. Magnitudes de potencia en el servidor.

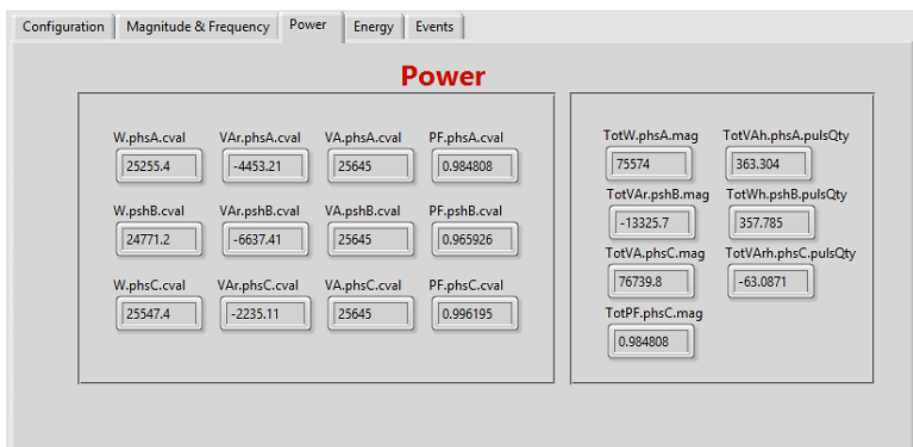


Figura 4.74. Magnitudes de potencia en el cliente.



Figura 4.75. Eventos de tensión en el servidor.



Figura 4.76. Eventos en el cliente.

## 4.5. Discusión de resultados

En este apartado se discuten los resultados de los ensayos y análisis realizados a lo largo de los diferentes apartados de la tesis.

### 4.5.1. Estudio de factores que afectan al tiempo de procesamiento

En este apartado se discuten los resultados de los ensayos realizados con el sistema basado en la plataforma hardware DK61 y la librería de comunicaciones PIS-10 para

estudiar la influencia de determinados factores relacionados con los datos sobre el tiempo de procesamiento en las comunicaciones IEC 61850.

Respecto a la influencia del tipo de dato la hipótesis de partida era que para datos con mayores longitudes en bytes se obtuvieran mayores tiempos de transferencia. Los resultados de los ensayos realizados para determinar dicha influencia muestran que no siempre hay una relación lineal entre el tamaño en bytes de los datos (y, por tanto, la longitud de la trama) y el tiempo de transferencia obtenido para todos los tipos de datos ensayados, en contra de lo esperado. Si bien es cierto que, en general, se cumple la hipótesis de partida, los resultados de los ensayos mostraron ciertas singularidades, tal como se ha descrito en los resultados.

Ante estos resultados, puesto que para mensajes con mayores longitudes de trama se deberían obtener mayores tiempos de transferencia, es claro que la implementación particular que ha realizado el fabricante provoca estas discrepancias con los resultados esperados. En [82], Silva *et al.* midieron el *Round-Trip delay* para diferentes sistemas operativos y pilas de comunicaciones, infiriendo que los resultados obtenidos estaban influenciados por la pila de comunicaciones. Por tanto, en consonancia con el trabajo descrito en [82], en la presente tesis se corrobora que este comportamiento es debido a las características particulares de implementación de la pila de comunicaciones.

Los ensayos realizados para determinar la influencia del número de objetos, siempre que los datos sean todos del mismo tipo, mostraron un comportamiento claramente lineal. En consonancia con la hipótesis de partida, esto es lo que se esperaba obtener, ya que dicho número de objetos de datos incide de manera directa y proporcional sobre la longitud de la trama. En [54], Fernandes *et al.* presentaron los resultados de evaluar el rendimiento de las comunicaciones IEC 61850 con mensajes GOOSE. En su estudio, los autores variaron el número de objetos de datos incluidos en un *data set*, concluyendo que a mayor número de datos se obtenían mayores tiempos de transferencia. De este modo, los resultados obtenidos en esta tesis para determinar la influencia del número de objetos de datos son consistentes con los presentados por Fernandes *et al.* en [54].

Respecto al estudio realizado para determinar la influencia sobre del tiempo de transferencia de los *data sets* y su actualización, hasta la fecha de finalización de esta tesis no se ha encontrado ningún estudio similar en la literatura consultada. Ninguno de los estudios previos describe comparación alguna en la cual los datos hayan sido dispuestos de diferentes modos mediante *data sets*. Aunque en [51] Sidhu *et al.* indican la importancia de una adecuada configuración de los *data sets* y presentan algunos ensayos para evaluación del rendimiento en la transmisión de mensajes GOOSE, ninguno de los ensayos descritos muestra la influencia de los *data sets* sobre el rendimiento. Del mismo modo, aunque en [47] Ozansoy *et al.* estudiaron diferentes aspectos relacionados con los *data sets*, tampoco llevaron a cabo ningún estudio acerca de su influencia sobre el tiempo de transferencia.

Los ensayos realizados mostraron una clara influencia de los *data sets* y su actualización sobre el tiempo de transferencia, tal como indican los resultados presentados en esta tesis. Dicha influencia se manifiesta tanto a la hora de agrupar los objetos de datos en diferente número de *data sets* como a la hora de actualizar los datos en el servidor y su consecuente transmisión. De hecho, los resultados obtenidos muestran que, para un determinado número de datos agrupados en diferente número de *data sets*, el tiempo de transferencia puede llegar a aumentar considerablemente, llegando casi a triplicarse en algunos de los casos presentados en esta tesis.

La explicación a esta fuerte influencia del número de *data sets* se encuentra en el hecho de que múltiples datos pertenecientes a un mismo *data set*, cuando se actualizan en el servidor para su transmisión, implica la generación de un único mensaje que contiene a todos los datos. Sin embargo, si los datos están dispersos en varios *data sets*, la necesidad de transmitirlos todos implica que se generan tantos mensajes como *data sets* contienen a los datos. Esto se traduce en una mayor carga computacional en el servidor para generar los mensajes, una mayor cantidad de tramas de red, con el consiguiente incremento del tráfico en la red y, finalmente, mayor carga computacional en el equipo cliente, que debe procesar la recepción de múltiples mensajes.

Los resultados obtenidos a la hora de analizar la posible influencia sobre el tiempo de transferencia del tipo de nodo lógico que alberga los datos han determinado que en el sistema basado en la plataforma DK61 y la librería PIS-10 sí hay dependencia. Aunque en un principio se pensó en las longitudes de tramas como factor determinante, puesto que distintos tipos de nodos lógicos daban lugar a longitudes de tramas diferentes, a la vista de los resultados se observó que esta influencia no está relacionada con la longitud de la trama. Por tanto, la longitud de la trama no es el principal factor que afecta al tiempo de transferencia.

Un análisis de la estructura de datos de los nodos lógicos que se seleccionaron para los ensayos apunta a que dicha estructura es una causa más que probable de la diferencia de rendimiento observada. Otra posible explicación apunta a la implementación particular de la pila de comunicaciones. De hecho, Silva *et al.* presentaron en [82] una serie de estudios para determinar la influencia de la pila de comunicaciones y el sistema operativo sobre el rendimiento de las comunicaciones, concluyendo que hay una clara dependencia de ambos factores. Así pues, en consonancia con los trabajos presentados por Silva *et al.* en [82], se deduce que el comportamiento observado en los ensayos realizados en esta tesis también puede ser debido a las características propias de implementación de la pila de comunicaciones y que, por tanto, es un factor que afecta directamente al tiempo de procesamiento.

Finalmente, en un principio se pensó que podría haber una influencia sobre el rendimiento de las comunicaciones si los datos referenciados mediante los *data sets* estaban incluidos en un único nodo lógico o estaban diseminados en varios nodos lógicos. Los resultados obtenidos en los ensayos para la plataforma DK61 con la librería PIS-10 han demostrado que no es así y, por lo tanto, no existe tal influencia. Esto es cierto siempre que los datos referenciados se encuentren en nodos lógicos del mismo tipo, pues tendrán la misma estructura de datos. Si no es así, los ensayos acerca de la influencia del tipo de nodo lógico no habrían sido válidos.

#### 4.5.2. Integración de IEC 61850 en un sistema embebido

En este apartado se discuten los resultados de los ensayos realizados con la plataforma basada en los controladores programables cRIO y la librería de comunicaciones industriales de *National Instruments* para estudiar la influencia de determinados factores relacionados con los datos sobre el tiempo de procesamiento en las comunicaciones IEC 61850.

Los ensayos realizados para determinar la influencia del número de objetos, siempre que los datos sean todos del mismo tipo, muestra un comportamiento casi lineal. Estos

resultados están en consonancia con los obtenidos para la plataforma DK61 con la librería PIS-10. Esto es lo que se esperaba obtener, ya que dicho número de objetos de datos incide directamente sobre la longitud de la trama. Los resultados obtenidos son consistentes con los presentados por Fernandes *et al.* en [54].

Al igual que sucedió con los resultados obtenidos con la librería PIS-10, en esta ocasión los ensayos realizados mostraron también una clara influencia de los *data sets* y su actualización sobre el tiempo de transferencia. Sin embargo, la librería PIS-10 y la librería de comunicaciones industriales de NI no incluyen las mismas posibilidades. La diferencia principal se manifiesta por el hecho de que la función de actualización de esta última no permite ser utilizada para actualizar varios *data sets* mediante una única llamada a la función. De hecho esto ha limitado el número de ensayos que se han llevado a cabo con esta plataforma.

Hasta la fecha de publicación de esta tesis no se ha encontrado ningún estudio similar en la literatura consultada. Ninguno de los estudios previos describe ninguna comparación en la cual los datos hayan sido dispuestos de diferentes modos mediante *data sets*. Aunque en [51] Sidhu *et al.* indican la importancia de una adecuada configuración de los *data sets* y presentan algunos ensayos para evaluación del rendimiento en la transmisión de mensajes GOOSE, ninguno de los ensayos descritos muestra la influencia de los *data sets* sobre el rendimiento. Del mismo modo, aunque en [47] Ozansoy *et al.* estudiaron diferentes aspectos relacionados con los *data sets*, no llevaron a cabo ningún estudio acerca de su influencia sobre el tiempo de transferencia.

#### 4.5.3. Integración de IEC 61850 en controladores con sistema VxWorks

El desarrollo del módulo de comunicaciones UCO61850 ha permitido obtener unos primeros resultados de la viabilidad de integración de una solución hardware para dotar de comunicaciones IEC 61850 al grupo de controladores que, de otro modo no podría beneficiarse de los servicios de comunicación GOOSE.

Ni en la revisión bibliográfica que se hizo antes de abordar este reto, ni en la realizada recientemente, se ha encontrado ningún desarrollo o propuesta similar.

Los tiempos de respuesta que se obtuvieron al analizar el rendimiento son superiores a los obtenidos con los otros dos sistemas analizados en esta tesis. Esto es lógico, ya que en ningún caso sería posible lograr tiempos menores que los que se obtienen utilizando la plataforma DK61 junto con la librería PIS-10, al ser ésta parte de la solución desarrollada. A los tiempos característicos que se obtienen con esta plataforma siempre habrá que añadirle el tiempo necesario para la comunicación entre el cRIO y el módulo desarrollado.

Si bien es cierto que los tiempos de transferencia que se obtuvieron son superiores a los presentados para los otros dos sistemas que se han estudiado en esta tesis, es probable que estudiando nuevos enfoques en el diseño del driver controlador del módulo se pueda lograr optimizar su tiempo de respuesta.

#### 4.5.4. Integración de IEC 61850 en un analizador de calidad de suministro

En este apartado se discuten los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de comunicaciones IEC 61850 a un PQA para su utilización con los inversores de una planta fotovoltaica experimental como parte de los trabajos desarrollados en el grupo de investigación TIC-240 de la Universidad de Córdoba, en el marco del proyecto PV-ONTIME, “Sistema inteligente de producción, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica on-time”.

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo de estudiar la integración del estándar IEC 61850 en un analizador experimental de calidad de suministro fue confirmar la posibilidad de aplicar el modelo de datos a las necesidades propias de esta aplicación. Los resultados obtenidos han confirmado que es viable aplicar el modelo basándose en los nodos lógicos estándar predefinidos en la parte 7-4 del estándar, sin necesidad de propuesta de nuevos nodos lógicos.

Los resultados también han mostrado que, una vez aplicado el modelo, los servicios de comunicación IEC 61850 facilitan la transferencia de los valores de las variables que integra el analizador experimental.

Respecto a la elección de nodos lógicos, los resultados de implementación mostrados en esta tesis son congruentes con los expuestos por Apostolov *et al.* en [57], Lloret *et al.* en [58], Fuchang *et al.* en [59], Kang y Li en [62], Xin en [63] y Lu *et al.* en [68].

#### 4.6. Implicaciones y recomendaciones prácticas

Basados en los ensayos realizados en esta tesis doctoral, se observó que varios factores relacionados con los datos tenían una influencia directa sobre el tiempo de transferencia y, por tanto, sobre el rendimiento de las comunicaciones IEC 61850. De estos estudios se pueden obtener algunas implicaciones que podrían contribuir a reducir el tiempo necesario para la transmisión de información a través de la optimización del tiempo de procesamiento.

Una de las principales características del estándar IEC 61850 es la aplicación de un modelo específico de datos mediante nodos lógicos. Esto implica que los nodos lógicos necesarios para la mayoría de aplicaciones están predefinidos en el estándar. En este caso no es recomendable utilizar otros nodos lógicos para mejorar el rendimiento de las comunicaciones, ya que esto iría en contra de la filosofía del propio estándar.

Sin embargo, hay algunos casos en los cuales es posible el uso de nodos lógicos genéricos (tales como GGIO) para modelar los datos. Por tanto, aunque no recomendado por algunos autores [83][84], podría ser una opción a considerar. Esto se debe decidir con cautela. Otro caso en el cual esto es posible es cuando la aplicación no dispone de nodos lógicos predefinidos. Esto sucede, por ejemplo, cuando se modelan aplicaciones aún no cubiertas por las partes publicadas del estándar.

El principal aspecto que puede contribuir a optimizar el rendimiento del sistema es la correcta utilización de los *data sets* y el modo en que los datos son agrupados para su transmisión cuando cambian. Para optimizar el rendimiento, según los estudios presentados en esta tesis, los datos más críticos en cuanto a respuesta temporal deben

ser referenciados mediante sus propios *data sets* en exclusiva. De este modo se logran menores tiempos de transferencia. Esto está en consonancia con los resultados presentados en [51] donde se estudió el tiempo de operación de protecciones enviando mensajes “trip”. El resto de objetos de datos deben ser adecuadamente agrupados mediante *data sets* para optimizar el tiempo de transferencia global, evitando la definición de *data sets* individuales por cada objeto de datos. Esto conduciría a tiempos de transferencia mayores en el caso de necesitar la transmisión de todos los datos.

De acuerdo con los experimentos realizados, el modo en el cual se utiliza la función de actualización para la transmisión de los datos también afecta al rendimiento. Para un grupo de datos distribuido en diferentes *data sets*, el tiempo que el primer dato necesita para ser recibido por el cliente ( $T_1$  en Figura 3.2) es menor cuando la función de actualización es llamada individualmente para cada *data set* definido. Sin embargo, en este caso, el tiempo total de transmisión ( $T_t$  en Figura 3.2) necesario para transmitir todos los datos se incrementa. Esto conduce a la recomendación de realizar la llamada a la función de actualización de forma individual para los datos y *data sets* más críticos en respuesta temporal.

Finalmente, la estructura del modelo para un determinado nodo lógico influye en el tiempo de procesamiento. Estructuras más complejas pueden conducir a tiempos de transferencia mayores. Esto se debe a que no todos los nodos lógicos están definidos utilizando el mismo número y tipo de objetos de datos. Otra posible explicación de estos resultados puede ser debida a los algoritmos internos particulares de la implementación de la pila de comunicaciones [82]. Esto debe ser tenido en cuenta cuando se definen nuevos nodos lógicos para aplicaciones en las cuales el rendimiento es un factor crítico.

Todas estas recomendaciones se deducen de los ensayos experimentales realizados en esta tesis y son consistentes con diversos trabajos previos publicados en la literatura que han sido referenciados a lo largo del texto.

La Tabla 4.41 resume de forma cualitativa la influencia sobre el tiempo de transferencia de los factores analizados en esta tesis.

**Tabla 4.41. Influencia de los factores relacionados con los datos.**

Factor	Influencia
Tipo de datos	Media
Numero de objetos de datos	Media
Data sets	Alta
Número de nodos lógicos	Ninguna
Tipo de nodo lógico	Media
Número de llamadas	Media





# 5 Conclusiones y trabajo futuro

Como capítulo final de esta tesis, se incluyen aquí las diferentes conclusiones que se derivan de la investigación llevada a cabo y de los resultados obtenidos.

Se mencionan también aquellos aspectos en los que por su complejidad, o por motivos de limitaciones temporales y de recursos, se han dejado líneas de investigación abiertas que pueden derivar en trabajos futuros.

## 5.1. Conclusiones

Los objetivos planteados en esta tesis han permitido abordar el estudio de diferentes aspectos relacionados con el estándar internacional IEC 61850.

La idea principal en torno a la cual se ha desarrollado la mayor parte de los trabajos realizados ha sido la evaluación del rendimiento de las comunicaciones basadas en el estándar IEC 61850. Sin embargo, con esta tesis no se ha pretendido insistir en el estudio de algunos aspectos ya considerados por la mayoría de autores que han estudiado, analizado, ensayado y/o simulado el rendimiento de las comunicaciones con el estándar IEC 61850. La influencia de factores relacionados con la red de comunicaciones sobre el tiempo de transferencia se ha estudiado ampliamente, bajo diferentes escenarios y sistemas.

Así pues, se han llevado a cabo diversos estudios para determinar la influencia de algunos factores relacionados con los datos sobre el tiempo de transferencia en las comunicaciones basadas en el estándar. Estos estudios se han llevado a cabo con dos plataformas hardware y software diferentes, lo cual ha permitido comprobar que el rendimiento de las comunicaciones está influenciado por la implementación particular de la pila de comunicaciones y el hardware sobre el que se ejecuta.

Los ensayos que se han realizado en esta tesis para determinar la influencia de diversos factores relacionados con los datos y su procesamiento no han sido objeto de análisis detallado en trabajos publicados por otros autores. Es por esto que se puede considerar que la principal contribución de esta tesis es la identificación y análisis de dichos factores. Para todos los ensayos se utilizó el tiempo total de transferencia como indicador del rendimiento de las comunicaciones, tal como se describe en el estándar.

Tras el análisis de los resultados se ha podido comprobar que no todos los factores estudiados afectan por igual al tiempo de transferencia, presentándose incluso diferencias de comportamiento según la plataforma de ensayo.

Las principales conclusiones que se extraen de los grupos de ensayos realizados son las siguientes:

- Influencia de los tipos de datos. Tras analizar los resultados obtenidos no se puede afirmar para todos los casos que a mayor tamaño en bytes de los datos, mayor tiempo de transferencia. Entre algunos tipos de datos pueden aparecer singularidades. Si bien es cierto que cuando se transmite un único dato, las diferencias son muy pequeñas y estas singularidades sólo se magnifican cuando el número de datos es considerable.
- Influencia del número de datos. El estudio de la influencia del número de datos confirma, en ambas plataformas, la hipótesis de que a mayor número de datos, mayor tiempo de transferencia.
- Influencia de los *data sets* y la función de actualización. Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados han mostrado que estos dos aspectos relacionados con los datos influyen significativamente sobre el tiempo de transferencia, tanto considerados por separado como combinados, ya que están íntimamente relacionados.
- Influencia de los nodos lógicos. Se concluye que la diferencia de estructura de datos que presentan unos nodos lógicos respecto a otros puede influir sobre el tiempo de procesamiento. Sin embargo, no se puede generalizar el grado de influencia, ya que los resultados obtenidos para ambas plataformas no son congruentes entre sí, lo cual apunta claramente a la dependencia de las características internas de la pila o librería de comunicaciones.

A la vista de este resumen conviene insistir en que una de las conclusiones más significativas que se han obtenido de estos estudios es la influencia del modo en el cual se agrupan los datos, por medio de *data sets*, y el modo en el cual los datos son actualizados para su envío por la correspondiente función. Así pues, el rendimiento de las comunicaciones puede ser optimizado mediante una adecuada selección de los *data sets* asociados a los datos a transmitir. Y, además, otro factor importante que puede contribuir a la mejora del rendimiento de la transmisión de información es el adecuado uso de la función de actualización, en combinación con el número de *data sets*.

Desde el punto de vista de respuesta en tiempo real, para aplicaciones críticas en el tiempo, como sucede en las aplicaciones de protección, se concluye que para lograr los mejores tiempos de respuesta los datos a transmitir deben tratarse individualmente. Desde un punto de vista práctico, esto se traduce tanto en que dichos datos deben ser los únicos elementos de su correspondiente *data sets*, como que se debe hacer un uso individual de la función de actualización para transmitir el cambio de su valor.

Este planteamiento pierde validez cuando son varios los datos que deben ser transmitidos simultáneamente en el menor tiempo posible. En este caso, los resultados de los análisis han mostrado que el rendimiento es óptimo cuando se agrupan todos en el mismo *data set* y se ejecuta una actualización común de los mismos.

Además de estas consideraciones, en segundo lugar cobra relevancia la influencia del modelo de datos, a través del concepto de nodo lógico. De las dos plataformas empleadas para los estudios, una de ellas ha mostrado una clara dependencia del tipo de nodo lógico en el cual se encuentra los datos, mostrando tiempos de respuesta sustancialmente diferentes. Puesto que el tipo de nodos lógicos está ligado al tipo de

aplicación, este es un factor que desde el punto de vista del usuario no es fácil actuar para optimizar el rendimiento de las comunicaciones. Este es un aspecto en el que deben trabajar e investigar los desarrolladores de las pilas y librerías de comunicaciones.

A pesar de esto, es cierto que las conclusiones extraídas sobre la influencia del tipo de nodo lógico constituyen una base para la posible definición de nuevos tipos de nodos lógicos para las comunicaciones en aplicaciones críticas en el tiempo. En esta línea sería interesante estudiar la posibilidad de crear versiones simplificadas de algunos tipos de nodos lógicos de modo que se lograra una reducción del tiempo de procesamiento asociado a los mismos.

Sintetizando, desde un punto de vista global, las observaciones y recomendaciones incluidas en estos estudios podrían llegar a mejorar el rendimiento de las aplicaciones tanto con eventos críticos como con grandes volúmenes de datos.

En cuanto al desarrollo llevado cabo con la implementación de un módulo hardware que permita integrar los servicios de comunicación GOOSE en controladores con sistema operativo VxWorks se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La integración en los controladores cRIO del sistema propuesto es viable, tal como demuestran los resultados preliminares incluidos en el estudio llevado a cabo.
- Aunque los tiempos de transferencia obtenidos son algo mayores que los que ofrecen ambas plataformas independientemente, en tanto en cuanto el fabricante de los equipos cRIO no modifique las características de su librería de comunicaciones para dotar de servicios de comunicación GOOSE a todos sus controladores, la utilidad de este módulo es indiscutible.

Por último, el tercer bloque de la tesis ha mostrado la viabilidad de integración del modelo de datos IEC 61850 en un prototipo de analizador experimental de calidad de suministro. Las principales conclusiones que se pueden extraer de los trabajos presentados en esta tesis son:

- La integración del modelo IEC 61850 en la aplicación del analizador experimental de calidad de suministro es viable mediante la utilización de nodos lógicos estándar definidos en la parte 7-4 de IEC 61850.
- La aplicación de los servicios de comunicación apropiados a cada tipo de datos es eficaz y permite comunicar los equipos perfectamente.
- Gracias a la aplicación del modelo de datos y los servicios de comunicaciones IEC 61850 se contribuye a la plena integración de este tipo de dispositivos en las redes eléctricas inteligentes.

## **5.2. Trabajo futuro**

A lo largo del desarrollo de esta tesis se han estudiado diferentes aspectos relacionados con el estándar IEC 61850, teniendo en cuenta los aspectos que se han considerado más relevantes. Sin embargo, durante la investigación han surgido temas y aspectos de interés que, o bien no se han tratado, o no se ha podido profundizar en ellos debido a limitaciones de tiempo y recursos.

Estos temas pueden representar líneas futuras de investigación que parten de esta tesis, e incluso desarrollos aplicables al ámbito de las redes eléctricas inteligentes. A continuación se exponen algunas posibles líneas de trabajo como continuación o complemento de esta tesis.

Los ensayos que se han llevado a cabo en esta tesis han estado centrados en los servicios de comunicación GOOSE. Una de las líneas naturales de continuación del trabajo realizado sería estudiar el comportamiento de los datos y del modelo de datos con los demás servicios de comunicación que define el estándar.

Otra línea de trabajo podría desarrollarse haciendo una comparativa de resultados al aplicar diferentes métodos para la medición del tiempo de transferencia.

Respecto al estudio de la influencia de los datos y el modelo de datos se podría plantear un estudio de rendimiento en función de qué o cuántos atributos de datos se seleccionen para su uso en las aplicaciones. Si se confirmara que hay influencia significativa sobre el tiempo de respuesta se verificaría la hipótesis de que nodos lógicos con estructura de datos simplificada permitirían optimizar el rendimiento de las comunicaciones.

Con objeto de contrastar los resultados obtenidos por los estudios realizados con la plataforma DK61 con la pila de comunicaciones PIS-10, así como con los controladores cRIO y la librería de comunicaciones industriales de *National Instruments*, sería interesante repetir los mismos ensayos sobre otras plataformas y sistemas. Esto permitiría extraer conclusiones más generales.

En cuanto al desarrollo del módulo de comunicaciones para controladores basados en sistemas operativos VxWorks hay aún mucho trabajo por delante. Por ejemplo, se puede comenzar por el desarrollo de un driver totalmente funcional que contemple todas las funciones necesarias para el acceso a los datos y a los servicios de comunicación.

Del mismo modo se puede investigar si mediante un módulo como el propuesto UCO61850 sería factible reducir la carga computacional del controlador cRIO al delegar en un hardware específico la tarea de las comunicaciones. En el caso de que se confirmara esta hipótesis, el desarrollo del módulo completo cobraría aún más relevancia.

Además, una vez concluido el desarrollo del driver completo para la gestión del módulo se podría realizar un estudio de influencia de los datos y extraer conclusiones analizando si se mantienen los patrones de tiempos de respuesta similares a los presentados en esta tesis o aparecen otros.

Además, en la línea de estudiar la integración del modelo de datos en el analizador experimental de suministro eléctrico, se podría plantear un estudio de rendimiento teniendo en consideración los factores que se han identificado aquí que afectan al rendimiento de las comunicaciones.

Finalmente, se puede mencionar que partiendo de la experiencia adquirida a lo largo de la presente tesis, se puede plantear la integración del estándar IEC 61850, como sistema de comunicaciones, en los próximos proyectos de investigación que se lleven a cabo por el grupo de investigación y que persigan la integración de dispositivos en las redes eléctricas inteligentes, Smart Grids.

## 6 Bibliografía

- [1] T. J. Hammons, “Dispersed generation and its impact in Europe on power system structure and secure power system operation”, in *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 930–937.
- [2] I. Colak, G. Fulli, S. Sagiroglu, M. Yesilbudak, and C. F. Covrig, “Smart grid projects in Europe: Current status, maturity and future scenarios”, *Appl. Energy*, vol. 152, pp. 58–70, 2015.
- [3] I. Colak, E. Kabalci, G. Fulli, and S. Lazarou, “A survey on the contributions of power electronics to smart grid systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, no. 1, pp. 562–579, 2015.
- [4] S. Blanco, “Las redes eléctricas inteligentes: ¿Qué es lo que hay que cambiar? ¿Cómo hacerlo? (1): la aportación de las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC)”. Fundación Gas Natural, Madrid, p. 1, 2010.
- [5] K. P. Schneider, D. Chassin, Y. Chen, and J. C. Fuller, “Distribution power flow for smart grid technologies”, *2009 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo.*, pp. 1–7, 2009.
- [6] V. Vyatkin, G. Zhabelova, N. Higgins, K. Schwarz, and N. K. C. Nair, “Towards intelligent smart grid devices with IEC 61850 interoperability and IEC 61499 open control architecture”, *2010 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Smart Solut. a Chang. World*, pp. 1–8, 2010.
- [7] A. Moreno-Muñoz, J. J. G. De La Rosa, R. J. Real-Calvo, and V. Pallarés, “Embedding measurement in Distribution Automation Systems”, *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 3722–3727, 2010.
- [8] S. Sučić, J. G. Havelka, and T. Dragičević, “A device-level service-oriented middleware platform for self-manageable DC microgrid applications utilizing semantic-enabled distributed energy resources”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 576–588, 2014.
- [9] A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, J. J. Gonzalez De La Rosa, R. Real-Calvo, M. Gonzalez-Redondo, and I. M. Moreno-Garcia, “Embedding synchronized measurement technology for smart grid development”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 52–61, 2013.
- [10] K. Shi, Y. Bi, and L. Jiang, “Middleware-based implementation of smart micro-grid monitoring using data distribution service over IP networks”, in *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2014, pp. 1–5.
- [11] IEEE Std 2030-2011, *IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads*, no. September. 2011.
- [12] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, “The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges”, *Comput.*

- Commun.*, vol. 36, no. 17–18, pp. 1665–1697, 2013.
- [13] T. Cucinotta, A. Mancina, G. F. Anastasi, G. Lipari, L. Mangeruca, R. Checco, and F. Rusina, “A Real-Time Service-Oriented Architecture for Industrial Automation”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 5, no. 3, pp. 267–277, 2009.
  - [14] I. M. Moreno-Garcia, A. Moreno-Munoz, F. Domingo-Perez, V. Pallares-Lopez, R. Real-Calvo, and I. Santiago-Chiquero, “Implementation of a smart grid inverter through embedded systems”, *Elektron. ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 3, pp. 3–6, 2013.
  - [15] International Electrotechnical Commission, “IEC 61850:2016 SER Series”, *IEC*. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6028>. [Accessed: 01-Nov-2016].
  - [16] T. Predojević, A. Al-Hezmi, J. Alonso-Zarate, and M. Dohler, “A real-time middleware platform for the smart grid”, in *2014 IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm)*, 2014, pp. 1–6.
  - [17] M. García-Gracia, S. Borroy, L. G. De Urtasun, and M. P. Comech, “Novel protection scheme based on IEC61850”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 12, pp. 2178–2187, 2011.
  - [18] L. Zhang, N. Gari, and L. V. Hmurcik, “Energy management in a microgrid with distributed energy resources”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 297–305, Feb. 2014.
  - [19] P. Siano, “Demand response and smart grids—A survey”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2014.
  - [20] IEC 61000-4-30:2015, *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurements methods*. International Electrotechnical Commission, 2015.
  - [21] ISO/IEC/IEEE 24765, *Systems and software engineering — Vocabulary*. IEEE, 2010.
  - [22] IEEE Std 1815-2010, *IEEE Standard for Electric Power Systems Communications – Distributed Network Protocol (DNP3)*, vol. 2012, no. October. 2012.
  - [23] International Electrotechnical Commission, “IEC Smart Grid Standardization Roadmap”, 2010.
  - [24] IEC 60870-6-503:2014, *Telecontrol equipment and systems - Part 6-503: Telecontrol protocols compatible with ISO standards and ITU-T recommendations - TASE.2 Services and protocol*. International Electrotechnical Commission, 2014.
  - [25] IEC 61968-1:2012, *Application integration at electric utilities - System interfaces for distribution management - Part 1: Interface architecture and general recommendations*. International Electrotechnical Commission, 2012.
  - [26] IEEE Std 1588-2008, *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, vol. 2008, no. July. 2008.
  - [27] C. Greer, D. A. Wollman, D. E. Prochaska, P. A. Boynton, J. A. Mazer, C. T. Nguyen, G. J. FitzPatrick, T. L. Nelson, G. H. Koepke, A. R. Hefner Jr, V. Y. Pillitteri, T. L. Brewer, N. T. Golmie, D. H. Su, A. C. Eustis, D. G. Holmberg, and S. T. Bushby, “NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0”, Gaithersburg, MD, Oct. 2014.

- [28] D. M. Edward Ingram, "Assessment of Precision Timing and Real-Time Data Networks for Digital Substation Automation", Queensland University of Technology, 2013.
- [29] C. Brunner, "IEC 61850 for power system communication", *Transm. Distrib. Expo. Conf. 2008 IEEE PES Powering Towar. Futur. PIMS 2008*, pp. 1–6, 2008.
- [30] Y. Liang and R. H. Campbell, "Understanding and Simulating the IEC 61850 Standard", *Ieee Trans. Power Deliv.*, vol. 22, pp. 1482–1489, 2007.
- [31] IEC 61850-7-2, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-2: Basic information and communication structure - Abstract communication service interface (ACSI)*. International Electrotechnical Commission, 2010.
- [32] IEC 61850-7-410, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-410: Basic communication structure - Hydroelectric power plants - Communication for monitoring and control*. International Electrotechnical Commission, 2012.
- [33] IEC 61850-7-420, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-420: Basic communication structure - Distributed energy resources logical nodes*. International Electrotechnical Commission, 2009.
- [34] IEC 61850-5:2013, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 5: Communication requirements for functions and device models*. International Electrotechnical Commission, 2013.
- [35] IEC 61850-7-4, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-4: Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes*. International Electrotechnical Commission, 2010.
- [36] M. Adamiak, D. Baigent, and R. Mackiewicz, "IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations: An Overview for Users", in *Protection & Control Journal*, 2009, pp. 61–68.
- [37] A. Apostolov, "Substation Automation Systems", in *Smart Grid Handbook, 3 Volume Set*, Wiley, 2016.
- [38] IEC 61850-9-2:2011, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3*. International Electrotechnical Commission, 2011.
- [39] IEC 61850-8-1:2011, *Communication networks and systems for power utility automation - Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3*. International Electrotechnical Commission, 2011.
- [40] IEEE Std 1646-2004, *IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation*. IEEE, 2005.
- [41] IEEE Std C37.115-2003, *IEEE Standard Test Methods for Use in the Evaluation of Message Communications Between Intelligent Electronic Devices in an Integrated Substation Protection, Control and Data Acquisition System*. IEEE, 2004.
- [42] H. Ito and K. Ohashi, "High Performance IEC 61850 GOOSE and Protection Relay Testing", *Pacworld*, no. Winter 2008, 2008.
- [43] A. Voiter, S. Bunin, and Y. Korzh, "Frame length influence on real data rate at Ethernet MAC level", in *International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, 2004, 2004, pp. 455–456.
- [44] Wireshark, "Wireshark", *Wireshark*. [Online]. Available:



- <https://www.wireshark.org/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [45] M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, and R. J. Real-Calvo, "Influence of data-related factors on the use of IEC 61850 for power utility automation" , *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 133, pp. 269–280, 2016.
  - [46] F. Engler, B. Kruimer, T. L. Kern, G. Schimmel, L. Andersson, and K. Schwarz, "IEC 61850 based digital communication as interface to the primary equipment" , in *CIGRE*, 2004, pp. 1–8.
  - [47] C. R. Ozansoy, A. Zayegh, and A. Kalam, "Object Modeling of Data and DataSets in the International Standard IEC 61850" , *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1140–1147, Jul. 2009.
  - [48] A. Bonetti and R. Douib, "Transfer time measurement for protection relay applications with the IEC 61850 standard" , in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, pp. 1–5.
  - [49] F. Steinhauser, T. Schossig, A. Klien, and S. Geiger, "Performance Measurements for IEC 61850 IEDs and Systems" , *Pacworld*, no. December 2010, 2010.
  - [50] W. Haizhu, C. Zexiang, S. Zhongyang, and Z. Zhihan, "Analysis of realtime performances of process-level networks based on IEC61850 SCSM Model" , in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, pp. 1820–1824.
  - [51] T. Sidhu, M. Kanabar, and P. Parikh, "Configuration and performance testing of IEC 61850 GOOSE" , in *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 2011, pp. 1384–1389.
  - [52] H. Georg, N. Dorsch, M. Putzke, and C. Wietfeld, "Performance evaluation of time-critical communication networks for Smart Grids based on IEC 61850" , in *2013 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2013, no. Ccses, pp. 43–48.
  - [53] D. Della Giustina, P. Ferrari, a. Flammini, S. Rinaldi, and E. Sisinni, "Automation of Distribution Grids With IEC 61850: A First Approach Using Broadband Power Line Communication" , *Instrum. Meas. IEEE Trans.*, vol. 62, no. 9, pp. 2372–2383, 2013.
  - [54] C. Fernandes, S. Borkar, and J. Gohil, "Testing of Goose Protocol of IEC61850 Standard in Protection IED" , *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 93, no. 16, pp. 30–35, May 2014.
  - [55] T. Yeh, S. Hsu, C. Chung, and M. Lin, "Conformance Test for IEDs Based on IEC 61850 Communication Protocol" , *J. Power Energy Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 289–296, 2015.
  - [56] U. C. Netto, D. De Castro Grillo, I. D. Lonel, E. L. Pellini, and D. V. Coury, "An ANN based forecast for IED network management using the IEC61850 standard" , *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 148–155, 2016.
  - [57] A. Apostolov, S. Member, C. Brunner, and K. Clinard, "Use of IEC 61850 Object Models for Power System Quality / Security Data Exchange" , *Distribution*, pp. 155–164, 2003.
  - [58] P. Lloret, J. L. Velásquez, L. Molas-Balada, R. Villafáfila, A. Sumper, and S. Galceran-Arellano, "IEC 61850 as a flexible tool for electrical systems monitoring" , *2007 9th Int. Conf. Electr. Power Qual. Util. EPQU*, 2007.

- [59] Yue Fuchang, Shao Lin, and Wu Zaijun, "Modeling and implementation of power quality monitoring device based on IEC 61850", in *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, 2012, pp. 1–5.
- [60] AMA Systems, "MMS EASE Lite", 2016. [Online]. Available: <http://www.ama-group.de/ama-systems/products-licenses/products-by-sisco/mms-ease-lite.html>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [61] Omicron, "IEDScout", 2016. [Online]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/products/all/secondary-testing-calibration/iedscout/noc/1/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [62] Y. Kang and L. Li, "Modeling and implementation of power quality monitoring IED based on IEC61850", *Proc. - 2011 Int. Conf. Comput. Inf. Sci. ICCIS 2011*, pp. 148–151, 2011.
- [63] J. B. Xin, "Building Power Quality Monitoring System Using Model Driven Architecture and IEC 61850", in *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007, pp. 422–425.
- [64] Al Presher, "IEC 61850 critical to smart grid designs", *Industrial ethernet book*, no. 74, pp. 11–13, 2013.
- [65] A. Apostolov, "Impact of IEC 61850 on power quality monitoring and recording", in *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009.*, 2009, pp. 1–4.
- [66] B. Yunus and H. Li, "Analysis of Power Quality Waveform for Data Transmission Efficiency over IEC 61850 Communication Standard", in *2006 IEEE International Power and Energy Conference*, 2006, pp. 161–166.
- [67] Y. jun Jia, H. wei Zhang, X. Cui, and X. Jia, "A Standardized Power Quality Information Platform for Multisource Information Fusion", in *Proceedings of the 2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, 2015, no. Ifeesm, pp. 787–790.
- [68] S. Lu, S. Repo, D. Della Giustina, F. A.-C. Figuerola, A. Lof, and M. Pikkarainen, "Real-Time Low Voltage Network Monitoring-ICT Architecture and Field Test Experience", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 2002–2012, Jul. 2015.
- [69] Moxa, "PT-7710 Series", *Moxa*. [Online]. Available: <http://www.moxa.com/product/PT-7710.htm>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [70] Beck IPC GmbH, "Development board DK61", 2015. [Online]. Available: <http://www.beck-ipc.com/en/products/sc1x3/dk61.asp>.
- [71] SystemCORP Embedded Technology, "IEC 61850 Stack", 2015. [Online]. Available: <http://www.systemcorp.com.au/products/softwarelibraries/iec61850/>.
- [72] Yokogawa, "Yokogawa Meters & Instruments Corporation". [Online]. Available: <http://tmi.yokogawa.com/discontinued-products/oscilloscopes/scopecorders/dl850dl850v-scopecorder/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [73] M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, R. J. Real-Calvo, M. A. Ortiz Lopez, and I. M. Moreno-Garcia, "IEC 61850 GOOSE transfer time measurement in development stage", in *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2013, pp. 1–6.

- [74] G. Jia and A. A. Taflanidis, “Non-parametric stochastic subset optimization utilizing multivariate boundary kernels and adaptive stochastic sampling”, *Adv. Eng. Softw.*, vol. 89, pp. 3–16, Nov. 2015.
- [75] National Instruments, “Conozca el Controlador CompactRIO, un Sistema Embebido robusto para su Aplicación de Control y Monitoreo”, 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/52251/es/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [76] National Instruments, “LabVIEW” . [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/esa/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [77] National Instruments, “NI-Industrial Communications for IEC 61850 14.0 Readme” , 2014. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374776a.html>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [78] National Instruments, “NI-Industrial Communications for IEC 61850 15.0 Help” . [Online]. Available: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373800D-01/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [79] National Instruments, “cRIO-9951 Module Development Kit (MDK) Overview” . [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/9017/en/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [80] National Instruments, “Multisim” . [Online]. Available: <http://www.ni.com/multisim/esa/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [81] I. M. Moreno-Garcia, E. J. Palacios-Garcia, V. Pallares-Lopez, I. Santiago, M. J. Gonzalez-Redondo, M. Varo-Martinez, and R. J. Real-Calvo, “Real-Time Monitoring System for a Utility-Scale Photovoltaic Power Plant.”, *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 6, p. 770, 2016.
- [82] P. Silva, L. Almeida, and R. Marau, “Temporal behavior of Ethernet communications : Impact of the operating system and protocol stack” , in *International Conference on Models of Information and Communication Systems*, 2010.
- [83] B. Muschlitz, “IEC 61850 Interoperability Challenges and Solutions” , *Pacworld Magazine*, 2012.
- [84] C. Brunner, “Extending IEC 61850” , *Pacworld Magazine*, no. December, 2012.

# **Anexo A: Publicaciones**



*Influence of data-related factors on the use of IEC 61850 for power utility automation*

Revista: Electric Power Systems Research.

Autores: M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, and R. J. Real-Calvo.

Volumen: 133. Páginas: 269–280. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.12.028.

Fecha de publicación: Abril 2016.

*IEC 61850 GOOSE transfer time measurement in development stage*

Congreso: 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).

Autores: M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, R. J. RealCalvo, M. A. O. Lopez, and I. M. Moreno-Garcia.

Páginas: 1-6. DOI: 10.1109/ISIE.2013.65637622.

Fecha de publicación: Mayo 2013.

*Testing transfer time in development stage for IEC 61850 based IEDs*

Congreso: ARSA 2012, Proceedings in Advanced Research in Scientific Areas 2012.

Autores: M. J. González-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallarés-Lopez, R. J. Real-Calvo, and I. M. Moreno-Garcia

Páginas: 1644–1648. ISBN: 978-80-554-0606-0. ISSN: 1338-9831.

Fecha de publicación: Diciembre 2012.





Contents lists available at ScienceDirect

## Electric Power Systems Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/epsr](http://www.elsevier.com/locate/epsr)

## Influence of data-related factors on the use of IEC 61850 for power utility automation



Miguel J. Gonzalez-Redondo\*, Antonio Moreno-Munoz, Victor Pallares-Lopez, Rafael J. Real-Calvo

Department of Computer Architecture, Electronics and Electronics Technology, University of Córdoba, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba, Spain

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 13 August 2015

Received in revised form

20 December 2015

Accepted 22 December 2015

## Keywords:

Smart grid

IEC 61850

Transfer time

Performance evaluation

## ABSTRACT

Smart grids play an important role in the development and modernization of the electric power system. Smart grids deal with the integration of information technology and the electric grid. In this context, a communication system is needed to achieve the main goals of smart grids. Interoperability between the systems has become an important issue. To achieve this, the IEC 61850 standard models the electric power system by means of a hierarchical data model based on semantics definitions. Existing and future applications for the electric power system heavily depend on the performance of the communication system. Several factors can affect the performance of the IEC 61850 communications. Previous studies have already analyzed the influence of network related aspects. In this research, some factors related to data and data modeling of IEC 61850 have been identified that influence the performance of the IEC 61850 devices, through the processing time. The study presented in this paper analyzes them and proposes practical recommendations to optimize the performance of the system. The results obtained reveal the importance of a proper use of data sets because their influence over the communications performance.

Crown Copyright © 2015 Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Smart grids (SGs) play an important role in the development and modernization of the electric power system. Many papers have been published related to different aspects of SGs, like distributed energy resources (DERs) [1] or distributed generation (DG) [2], to mention some. Smart grids rely on the integration of information technology (IT) and the electric grid. The electric grids of the future need to modernize the current energy management systems (EMSS). One of the objectives is that the bidirectional flow of energy adapts dynamically to the new DERs [3] with a high degree of stability, coordination and synchronism [4]. For this, it is important to consider the requirements for a common communication system, like quality of service (QoS), flexibility and security [5].

A clear definition of the needs and the interoperability between the systems is necessary to achieve such objectives. The IEEE 2030 standard [6] for the smart grid defines the types of interoperability between different technologies and energy power systems (EPSS). It establishes the smart grid interoperability reference

model (SGIRM). This model gives a perspective for the integration of the architecture of the power system with the communication system and with the technology for the processing and broadcasting of the information.

Applying a common methodology is necessary to develop intelligent systems that integrate in an infrastructure based on the SGIRM model. The IEC 61970 [7] and IEC 61969 [8] standards are the methodological base for the horizontal and vertical integration of all the resources, allowing for the interchange of information between the power grid and companies. These standards define a common information model (CIM) for energy management [9].

The international standard IEC 61850 facilitates the integration of the equipment with a communication architecture based on the distributed interconnection principles and the semantic definition of data to achieve the desired interoperability. For such systems, the use of software tools with the middleware technology is suitable [5,10]. This concept is widely used to define those applications that allow for interaction or communication with other applications, networks and devices in a distributed system.

Definitely, it is the development of capacities for a dynamic grid with a service-oriented architecture (SOA) [11,12], as referred to in the standard IEC 62357 [13], that facilitates the integration of independent systems in a common scenario based on

\* Corresponding author. Tel.: +34 957 218 423; fax: +34 957 218 373.  
E-mail address: [mgonzalez@uco.es](mailto:mgonzalez@uco.es) (M.J. Gonzalez-Redondo).



- Electr. Power Syst. Res. 121 (2015) 368–378, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.11.025>.
- [7] S. Subić, T. Dragičević, T. Capuder, M. Delimar, Economic dispatch of virtual power plants in an event-driven service-oriented framework using standards-based communications, *Electr. Power Syst. Res.* 81 (2011) 2108–2119, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.08.008>.
  - [8] J.C. Nieves, A. Espinosa, Y.K. Penya, M.O. de Mues, A. Peña, Intelligence distribution for data processing in smart grids: a semantic approach, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 26 (2013) 1841–1853, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2013.03.016>.
  - [9] E. Ancillotti, R. Bruno, M. Conti, The role of communication systems in smart grids: architectures, technical solutions and research challenges, *Comput. Commun.* 36 (2013) 1665–1697, <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2013.09.004>.
  - [10] I.M. Moreno-García, A. Moreno-Munoz, F. Domingo-Perez, V. Pallares-Lopez, R.J. Real-Calvo, I. Santiago-Chiquero, Implementation of a smart grid inverter through embedded systems, *Electron. Electr. Eng.* 19 (2013) 3–6, <http://dx.doi.org/10.5755/ee.19.3.178>.
  - [11] T. Predojević, A. Al-Hezmi, J. Alonso-Zarate, M. Dohler, A real-time middleware platform for the smart grid, in: 2014 IEEE Online Conf. Green Commun., IEEE, 2014, pp. 1–6, <http://dx.doi.org/10.1109/OnlineGreenCom.2014.7114440>.
  - [12] M. García-Gracia, S. Borroy, L.G. de Urzua, M.P. Comech, Novel protection scheme based on IEC61850, *Electr. Power Syst. Res.* 81 (2011) 2178–2187, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.07.017>.
  - [13] D. Della Giustina, P. Ferrar, A. Flammini, S. Rinaldi, E. Sisinni, Automation of distribution grids with IEC 61850: a first approach using broadband power line communication, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 62 (2013) 2372–2383, <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2013.2270922>.
  - [14] Y. Yeh, S. Hsu, C. Chung, M. Lin, Conformance test for IEDs Based on IEC 61850 communication protocol, *J. Power Energy Eng.* 03 (2015) 289–296, <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2015.34039>.
  - [15] IEC 61850-5-2013, Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models, 2013, pp. 1–306, (<https://webstore.iec.ch/publication/6012>).
  - [16] IEC TR 61850-1, Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 1: Introduction and Overview, 2013, pp. 1–73, (<https://webstore.iec.ch/publication/6007>).
  - [17] IEC 61850-7-4, Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 7-4: Basic Communication Structure—Compatible Logical Node Classes and Data Object Classes, 2010, pp. 1–179, (<https://webstore.iec.ch/publication/6017>).
  - [18] IEC 61850-7-410, Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 7-410: Basic Communication Structure—Hydroelectric Power Plants—Communication for Monitoring and Control, 2012, pp. 1–122, (<https://webstore.iec.ch/publication/6018>).
  - [19] IEC 61850-7-420, Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 7-420: Basic Communication Structure—Distributed Energy Resources Logical Nodes, 2009, pp. 1–99, (<https://webstore.iec.ch/publication/6019>).
  - [20] IEC 61850-7-2, Communication Networks and systems for Power Utility Automation—Part 7-2: Basic Information and Communication Structure—Abstract Communication Service Interface (ACSI), 2010, pp. 1–213, (<https://webstore.iec.ch/publication/6015>).
  - [21] M. Adamiak, D. Baigent, R. Mackiewicz, IEC 61850 communication networks and systems in substations: an overview for users, *Prot. Control J.* (2009) 61–68, (<http://www.gedigitalenergy.com/multiin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf>).
  - [22] IEC 61850-7-1, Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 7-1: Basic Communication Structure—Principles and Models, 2011, pp. 1–289, (<https://webstore.iec.ch/publication/6014>).
  - [23] IEEE Std 1645-2004, IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation, 2005, pp. 1–24, <http://dx.doi.org/10.1109/IEESTD.2005.95748>.
  - [24] IEEE Std C37.115-2003, IEEE Standard Test Methods for Use in the Evaluation of Message Communications between Intelligent Electronic Devices in an Integrated Substation Protection, Control and Data Acquisition System, 2004, pp. 1–82, <http://dx.doi.org/10.1109/IEESTD.2004.94574>.
  - [25] F. Engler, B. Krümer, T.L. Kern, G. Schimmel, L. Andersson, K. Schwarz, IEC 61850 Based Digital Communication as Interface to the Primary Equipment, *CIGRE*, 2004, pp. 1–8.
  - [26] H. Ito, K. Ohashi, High Performance IEC 61850 GOOSE and Protection Relay Testing, *Pacworld*, 2008, ([https://www.pacworld.org/fileadmin/doc/WinterIssue08/protection\\_Toshiba\\_winter08.pdf](https://www.pacworld.org/fileadmin/doc/WinterIssue08/protection_Toshiba_winter08.pdf)).
  - [27] C.R. Ozansoy, A. Zayegh, A. Kalam, Object modeling of data and datasets in the international standard IEC 61850, *IEEE Trans. Power Deliv.* 24 (2009) 1140–1147, <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2005658>.
  - [28] A. Bonetti, R. Douib, Transfer time measurement for protection relay applications with the IEC 61850 standard, in: 2010 IEEE Int. Symp. Electr. Insul., IEEE, 2010, pp. 1–5, <http://dx.doi.org/10.1109/ELINSUL.2010.5549563>.
  - [29] F. Steinhäuser, T. Schossig, A. Klien, S. Geiger, Performance Measurements for IEC 61850 IEDs and Systems, *Pacworld*, 2010, ([http://www.pacworld.org/issue/december\\_2010/issue/performance/implementation\\_firewalls\\_for\\_model\\_substation\\_cybersecurity/complete\\_article/1.html](http://www.pacworld.org/issue/december_2010/issue/performance/implementation_firewalls_for_model_substation_cybersecurity/complete_article/1.html)).
  - [30] W. Haizhu, C. Zexiang, S. Zhongyang, Z. Zhihan, Analysis of realtime performances of process-level networks based on IEC61850 SC5M Model, in: 2011 4th Int. Conf. Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol., IEEE, 2011, pp. 1820–1824, <http://dx.doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994194>.
  - [31] T. Sidhu, M. Kanabar, P. Parikh, Configuration and performance testing of IEC 61850 GOOSE, in: 2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Autom. Prot., IEEE, 2011, pp. 1384–1389, <http://dx.doi.org/10.1109/APAP.2011.6180593>.
  - [32] H. Georg, N. Dorsch, M. Putzke, C. Wietfeld, Performance evaluation of time-critical communication networks for Smart Grids based on IEC 61850, in: 2013 IEEE Conf. Comput. Commun. Work. (INFOCOM WKSHPS), IEEE, 2013, pp. 43–48, <http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMW.2013.6562906>.
  - [33] C. Fernandes, S. Borkar, J. Cohil, Testing of goose protocol of IEC61850 standard in protection IED, *Int. J. Comput. Appl.* 93 (2014) 30–35, <http://dx.doi.org/10.5120/16301-6112>.
  - [34] U.C. Netto, D. de Castro Grillo, I.D. Lomel, E.L. Pellini, D.V. Coury, An ANN based forecast for IED network management using the IEC61850 standard, *Electr. Power Syst. Res.* 130 (2016) 148–155, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.026>.
  - [35] A. Volter, S. Bunin, Y. Kozh, Frame length influence on real data rate at Ethernet MAC level, in: IEEE (Ed.), Int. Conf. Mod. Probl. Radio Eng. Telecommun. Comput. Sci. 2004, IEEE, 2004, pp. 455–456, (<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1366026>).
  - [36] Beck IPC GmbH, Development board DK61, 2015, (<http://www.beck-ipc.com/en/products/sc1x3/dk61.asp>) (accessed July 01, 2015).
  - [37] SystemCORP Embedded Technology, IEC 61850 Stack, 2015, (<http://www.systemcorp.com.au/products/softwarelibraries/iec61850/>) (accessed July 01, 2015).
  - [38] M.J. González-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, R.J. Real-Calvo, M.A. Ortiz Lopez, I.M. Moreno-García, IEC 61850 GOOSE transfer time measurement in development stage, in: IEEE (Ed.), 2013 IEEE Int. Symp. Ind. Electron., IEEE, 2013, pp. 1–6, <http://dx.doi.org/10.1109/ISIE.2013.6563762>.
  - [39] P. Silva, L. Almeida, R. Marau, Temporal behavior of Ethernet communications: Impact of the operating system and protocol stack, in: Int. Conf. Model. Inf. Commun. Syst., Rabat, Morocco, 2010, (<http://hdl.handle.net/10216/56958>).
  - [40] B. Muschitz, IEC 61850 Interoperability Challenges and Solutions, *Pacworld Mag.* 2012, ([http://www.pacworld.org/issue/december\\_2012/issue/interoperability\\_a\\_new\\_fault\\_location\\_method/complete\\_article/1.html](http://www.pacworld.org/issue/december_2012/issue/interoperability_a_new_fault_location_method/complete_article/1.html)).
  - [41] C. Brunner, Extending IEC 61850, *Pacworld Mag.* 2012, ([https://www.pacworld.org/issue/december\\_2012/issue/cover\\_story/extending\\_iec61850/complete\\_article/1.html](https://www.pacworld.org/issue/december_2012/issue/cover_story/extending_iec61850/complete_article/1.html)).
  - [42] T.S. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, Extending IEC 61850-7-420 for distributed generators with fault current limiters, in: 2011 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol., IEEE, Perth, WA, 2011, pp. 1–8, <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2011.6167079>.

# IEC 61850 GOOSE transfer time measurement in development stage

Miguel J. González-Redondo, Antonio Moreno- Muñoz, Víctor Pallarés-López, Rafael J. Real-Calvo, Manuel A. Ortiz López, Isabel M. Moreno-García

Department of Computer Architecture, Electronics and Electronics Technology  
University of Córdoba  
Córdoba, Spain  
mgonzalez@uco.es

**Abstract**— IEC 61850 is one of the crucial standards within the Smart Grid concept. For performance evaluation of communications between Intelligent Electronic Devices (IED) in Power Utility Automation, the standard defines the Transfer Time. Measurement of such parameter is not available for end user, but in development stage it is possible. Third party products can be used to reduce development time of IEC 61850 compliant devices. An initial performance evaluation of these products can be achieved through the measurement of the Transfer Time.

*IEC 61850; Intelligent Electronic Device; GOOSE.*

## I. INTRODUCTION

Communication networks are used in modern substations to exchange information between Intelligent Electronic Devices (IED). The standard IEC 61850, "Communication networks and systems in substations" was developed and published between 2003 and 2005 to standardize that information exchange over communication networks and to achieve interoperability between the IEDs [1,2].

Commercial Off The Shelf (COTS) solutions [3] are been used in several areas when designing both hardware and software products. This choice has benefits and drawbacks [4], but the main benefit is that it can reduce the development time. COTS solutions can also be used in the development of IEC 61850 IEDs.

Related with the performance of the message transmission in the context of IEC 61850, the transfer time is defined in part 5 of the standard. From this definition derive several performance tests that can be accomplished to evaluate the devices under development. In this paper, a brief overview around these performance tests is included. Also, a simple testbed for evaluation purpose of a COTS solution is described and tests for measurement of transfer time are accomplished.

## II. CHANGES IN THE STANDARD IEC 61850

The standard IEC 61850 was developed and published between 2003 and 2005 to standardize information exchange over communication networks and to achieve interoperability between IEDs [1]. Several papers have been published around this standard [1, 2]. Nowadays, the standard has changed its

name to "Communication networks and systems in power utility automation". Several parts have been updated and labeled as "edition 2". The extension of the standard outside the substation (hydroelectric power plants, e.g.) has led to the inclusion of new parts, some of them already published.

Table I lists the main published parts of the IEC 61850 standard. It can be seen which parts have been recently published and which ones have been revised.

TABLE I MAIN PUBLISHED PARTS OF IEC 61850

Part-Edi-tion-Pub Date- Title
IEC/TR 61850-1 ed2.0 (2013-03). Introduction and Overview
IEC/TS 61850-2 ed1.0 (2003-08). Glossary
IEC 61850-3 ed1.0 (2002-01). General Requirements
IEC 61850-4 ed2.0 (2011-04). System and Project Management
IEC 61850-5 ed2.0 (2013-01). Communications Requirements for Functions and Device Models
IEC 61850-6 ed2.0 (2009-12). Configuration Description Language for Communication in Electronic Substation Related to IEDs
IEC 61850-7-1 ed2.0 (2011-07). Basic communication structure - Principles and models
IEC 61850-7-2 ed2.0 (2010-08). Basic information and communication structure - Abstract communication service interface (ACSI)
IEC 61850-7-3 ed2.0 (2010-12). Basic communication structure - Common data classes
IEC 61850-7-4 ed2.0 (2010-03). Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes
IEC 61850-7-410 ed2.0 (2012-08). Hydroelectric power plants - Communication for monitoring and control
IEC 61850-7-420 ed1.0 (2009-03). Basic communication structure - Distributed energy resources logical nodes
IEC/TR 61850-7-510 ed1.0 (2012-03). Basic communication structure - Hydroelectric power plants - Modeling concepts and guidelines
IEC 61850-8-1 ed2.0 (2011-08). Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO IEC 8802-3
IEC 61850-9-1 ed1.0 (2003-05). Specific communication service mapping (SCSM) - Samples values over serial unidirectional multidrop point to point link
IEC 61850-9-2 ed2.0 (2011-09). Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO IEC 8802-3
IEC 61850-10 ed2.0 (2012-12). Conformance testing

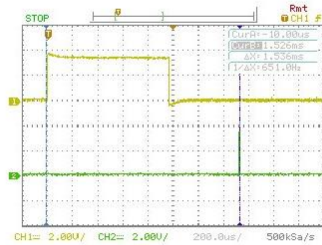


Figure 11. Measurement of overall transfer time  $t_t$

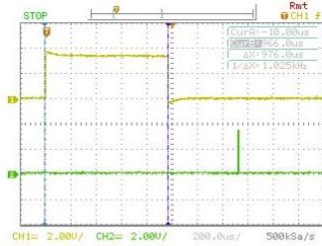


Figure 12. Measurement of  $t'$

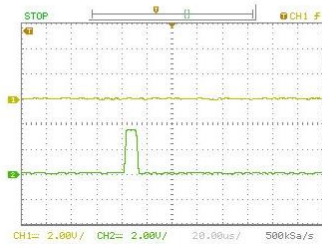


Figure 13. Measurement of  $t'_c$

TABLE IV. EXPERIMENTAL TRANSFER TIME

	Test 1 Transfer Time	Test 2 Transfer Time
$t_a$	0.976 ms	1.640 ms
$t_b$	0.544 ms	0.684 ms
$t_c$	0.016 ms	0.016 ms
$t_t$	1.536 ms	2.340 ms

## IX. CONCLUSIONS

None of the tests related to performance of communications included in the survey leads to a direct measurement of transfer time as defined in the standard. In development stage a measurement of the transfer time is crucial to allow for the developers to get such performance indicator. A system that exceed the maximum transfer time for the performance classes related to the target application must be discarded. A testbed for an initial performance evaluation of a Commercial Off The Shelf (COTS) solution for IEC 61850 devices has been used to show a simple methodology based on physical measurements of the transfer time. Simple tests have been accomplished for the shortest GOOSE message showing that the system is suitable for the most exigent applications with a transfer time in the order of 1.5 ms. This time will vary with the complexity of the development. However several software functions could be implemented which the transfer time below 3 ms.

In order to build IEC61850 devices, this methodology permits to consider or discard a COTS solution in first stages of development. But depending on the complexity of the system, it could be needed more complicated tests.

## REFERENCES

- [1] C. Brunner, "IEC 61850 for power system communication" Proc. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE Press, Apr. 2008, pp. 1-6. doi: 10.1109/TDC.2008.4517287.
- [2] Y. Liang & R.H. Campbell, "Understanding and simulating the IEC 61850 standard", Department of Computer Science University of Illinois, Urbana-Champaign, 2008. [Online]. Available: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/11457>
- [3] C. Coutts and P. Gerdes, "Integrating COTS Software: Lessons from a Large Healthcare Organization," IT Professional, vol. 12, pp. 50-58, 2010
- [4] John R. Blanchette, "Pros and cons of using COTS products". IEEE Autotestcon, 2005.
- [5] F. Steinhauser, T. Schossig, A. Klien, S. Geiger, "Performance Measurements for IEC 61850 IEDs and Systems", OMICRON electronics, Austria, PacWorld December 2010. [Online]. Available: [http://www.pacw.org/issue/december\\_2010\\_issue/performance/implementation\\_firewalls\\_for\\_modern\\_substation\\_cybersecurity/complete\\_article/1.html](http://www.pacw.org/issue/december_2010_issue/performance/implementation_firewalls_for_modern_substation_cybersecurity/complete_article/1.html)
- [6] H. Ito and K. Ohashi, Toshiba Corporation, "High Performance IEC 61850 GOOSE and Protection Relay Testing", Japan, PacWorld Winter 2008. [Online]. Available: [http://www.pacw.org/issue/winter\\_2008\\_issue/protection\\_goose\\_high\\_performance\\_iec\\_61850\\_goose\\_and\\_protection\\_relay\\_testing.html](http://www.pacw.org/issue/winter_2008_issue/protection_goose_high_performance_iec_61850_goose_and_protection_relay_testing.html)
- [7] A. Bonetti, R. Douib, "Transfer time measurement for protection relay applications with the IEC 61850 standard" Proc. IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2010).
- [8] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation, 2013, IEC 61850-5, edition 2.
- [9] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation, 2012, IEC 61850-10, edition 2.
- [10] V. Pallarés-López, A. Moreno-Muñoz, M. Gonzalez-Redondo, R. Real-Calvo, I. M. Moreno Garcia, J. M. Flores Arias, A. Gil de Castro, J.J. González de la Rosa, "Synchronism with Software-Based IEEE 1588-2008 for Smart Grid". ISIE, 2011.





# Testing transfer time in development stage for IEC 61850 based IEDs

Miguel J. González-Redondo, Antonio Moreno- Muñoz, Víctor Pallarés-López, Rafael J. Real-Calvo, Isabel M. Moreno-García

Department of Computer Architecture, Electronics and Electronics Technology  
University of Córdoba  
Córdoba, Spain  
mgonzalez@uco.es

**Abstract**— IEC 61850 is becoming one of the most important standards for communications between Intelligent Electronic Devices (IED) in Power Utility Automation. The development of IEC 61850 compliant devices can be accomplished utilizing commercial products. Performance evaluation of these products must be achieved in order to verify their conformance with the application requirements.

*IEC 61850; Intelligent Electronic Device; GOOSE.*

## I. INTRODUCTION

Intelligent electronic devices (IED) are used in electrical substations to control and protect the equipments of the substation [1]. An IED is a microprocessor-based controller of power system equipment (like circuit breakers, transformers...) that can receive data from sensors and power equipments and issue control commands to other equipments. An IED is able to perform several functions, taking advantage of its general-purpose microprocessors. [2]

IEDs need to exchange information to accomplish their functions. This exchange of information can be done between IEDs and between IEDs and local HMI, for example. To achieve this, communication networks are used in modern substations. The standard IEC 61850, "Communication networks and systems in substations" was developed and published between 2003 and 2005 to standardize that information exchange over communication networks and to achieve interoperability between the IEDs [1].

Nowadays the standard IEC 61850 has changed its name to "Communication networks and systems in power utility automation" due to its extension to other fields besides substations. In addition several parts of the original standard has been updated and labeled as "edition 2", and others are under revision.

The IEC 61850 standard is very complex. The development of a system capable of communicating according to the standard can involve a huge investment in development time. However, as in other fields of engineering, there are several alternatives to develop an IEC 61850 IED and some of them imply less time, effort and cost than others. This is the case of using Commercial Off The Shelf (COTS) solutions [3]. Several papers have discussed about benefits and drawbacks on using COTS hardware/software in the development of commercial

products [4]. The use of COTS software and hardware products leads to faster time to market, which can produce significant advantages over competitors when it comes to the introduction of a new product on the market.

## II. STANDARD IEC 61850

The standard IEC 61850, "Communication networks and systems in substations" was developed and published between 2003 and 2005 to standardize information exchange over communication networks and to achieve interoperability between IEDs [1].

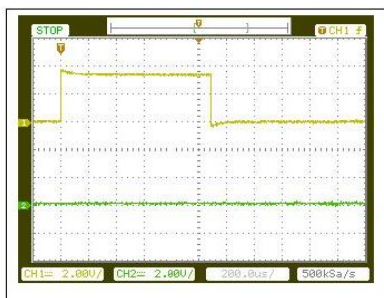
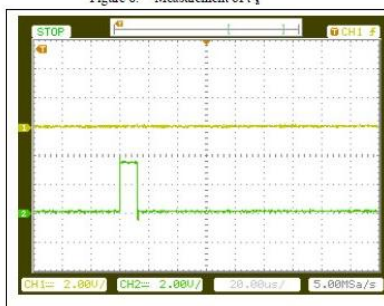
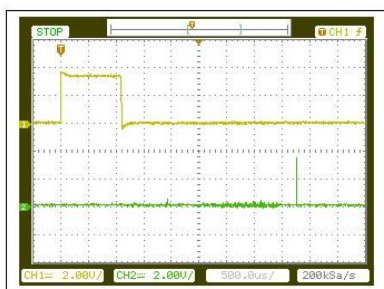
The first release of IEC 61850 was of a set of documents of over 1,400 pages divided into 10 parts.

Parts 1 to 3 give some general ideas about the standard. Part 4 defines the project and management requirements in an IEC 61850 enabled substation. Part 5 specifies the required parameters for physical implementation. Part 6 defines an XML based language for IED configuration, presenting a formal view of the concepts in the standard. Part 7 elaborates on the logical concepts, which is further divided into four subparts. Part 8 talks about how to map the internal objects to the presentation layer and to the Ethernet link layer. Part 9 defines the mapping from sampled measurement value (SMV) to point-to-point Ethernet. The last part gives instructions on conformance testing [2].

The second edition of some parts of the standard (now called "Communication networks and systems for power utility automation") has been recently released. Also, several extensions have been included, like parts 7-410, 7-420 and 7-510, i.e., as listed in Table I. Other parts are under revision and new extensions are being prepared.

## III. COMMUNICATIONS PROFILES

The IEC 61850 standard defines a structure of communications with five kinds of communication profiles that supports event driven as well as time critical information exchange between IEDs. These communication profiles are the Abstract Communication Service Interface profile (ACSI), the Generic Object Oriented Substation Event profile (GOOSE), the Generic Substation Status Event profile (GSSE),

Figure 8. Measurement of  $t_a$ Figure 9. Measurement of  $t_c$ Figure 10. Measurement of  $t_b$ 

## VII. RESULTS

Figures 8 to 10 show graphically the measurements of different components of the transfer time. Summarizing it,  $t_a$  is 1.040 ms,  $t_b$  is 3.160 ms and  $t_c$  is 0.020 ms. Thus, the total time is 4.220 ms. The delay introduced by calling the function for activation of the physical output is in the order of microseconds. This measurements have been got with a simple test application, and is expected be smaller with a new and optimized version of the test application in which we are working.

## VIII. CONCLUSIONS

In this paper, a survey on tests related to performance of communications according to IEC 61850 has been done. All tests are based on the transfer time as defined in the standard, but none of them lead to a direct measurement of such transfer time and its individual times. A simple methodology based on physical measurements have been presented and achieved over a commercial solution for implementation of IEC61850 compliant devices.

## REFERENCES

- [1] C. Brunner, "IEC 61850 for power system communication" Proc. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE Press, Apr. 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC.2008.4517287.
- [2] Y. Liang & R.H. Campbell, "Understanding and simulating the IEC 61850 standard", Department of Computer Science University of Illinois, Urbana-Champaign, 2008. [Online]. Available: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/11457>
- [3] C. Coutts and P. Gerdes, "Integrating COTS Software: Lessons from a Large Healthcare Organization," IT Professional, vol. 12, pp. 50-58, 2010
- [4] John R. Blanchette, "Pros and cons of using COTS productos", IEEE Autotestcon, 2005.
- [5] D. Baigent, M. Adamiak, and R. Mackiewicz, "IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations: An Overview for Users". SIPSEP, 2004.
- [6] F. Steinhauser, T. Schossig, A. Klien, S. Geiger, "Performance Measurements for IEC 61850 IEDs and Systems", OMICRON electronics, Austria, PacWorld December 2010. [Online]. Available: [http://www.pacw.org/issue/december\\_2010\\_issue/performance/implementing\\_firewalls\\_for\\_modern\\_substation\\_cybersecurity/complete\\_article/1.html](http://www.pacw.org/issue/december_2010_issue/performance/implementing_firewalls_for_modern_substation_cybersecurity/complete_article/1.html)
- [7] H. Ito and K. Ohashi, Toshiba Corporation, "High Performance IEC 61850 GOOSE and Protection Relay Testing", Japan, PacWorld Winter 2008. [Online]. Available: [http://www.pacw.org/issue/winter\\_2008\\_issue/protection\\_goose/high\\_performance\\_iec\\_61850\\_goose\\_and\\_protection\\_relay\\_testing.html](http://www.pacw.org/issue/winter_2008_issue/protection_goose/high_performance_iec_61850_goose_and_protection_relay_testing.html)
- [8] A. Bonetti, R. Douib, "Transfer time measurement for protection relay applications with the IEC 61850 standard" Proc. IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI 2010).
- [9] Communication Networks and Systems in Substation 2003, IEC 61850-5, 1<sup>st</sup> edition.
- [10] Communication Networks and Systems in Substation 2005, IEC 61850-10, 1<sup>st</sup> edition.